



**Acoplamento modelos mesoescala/microescala - calibração  
para aplicações de análise dinâmica da capacidade de  
transmissão de linhas eléctricas**

Frederico Cardoso de Melo

**Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente**

Dissertação orientada por:  
Professora Doutora Ana Isabel Lopes Estanqueiro  
Mestre António Manuel Vitoriano Couto

## Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer aos meus pais, não só por todo o apoio demonstrado em todos os aspetos da minha vida, mas também, pela especial compreensão e companheirismo durante os últimos anos. Um especial agradecimento para o seu apoio durante esta fase, pois através da sua ajuda em variados aspetos, possibilitaram o cumprimento dos meus objetivos académicos e pessoais. Sem eles nada disto teria sido possível.

Um enorme e especial agradecimento à Beatriz, que demonstrou todo um apoio incondicional, ajudando-me a alcançar um equilíbrio que me levou ao terminar desta fase da minha vida.

Seguidamente queria prestar um real e especial agradecimento à Andreia, que apesar de todos os problemas e dificuldades sempre demonstrou um enorme esforço e dedicação na ajuda ao completar desta fase da minha vida. Ressalvando que mesmo com todas as dificuldades da sua vida, sem a sua presença esta jornada teria sido mais difícil de ultrapassar.

Um especial agradecimento aos meus orientadores, Mestre António Couto e Prof. Doutora Ana Estanqueiro pela sua orientação e tempo despendido durante este trabalho. Devido a eles tornei-me um estudante mais completo em inúmeros aspectos.

Finalmente, presto os meus agradecimentos à Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e ao LNEG que possibilitaram o cumprir dos meus objetivos académicos, através da facultação de todos os recursos e meios para o cumprimento do meu trabalho.

## Resumo

O panorama de crescente integração de energias renováveis descentralizadas nos *mix* energéticos levanta um conjunto de desafios às atividades de operação e planeamento das redes eléctricas de transporte e distribuição de energia. Em específico, a operação de linhas eléctricas de energia com níveis de carga muito próximos dos seus limites térmicos começa a tornar-se um fenómeno cada vez mais frequente. A abordagem tradicional para resolução deste desafio passa pelo moroso e oneroso investimento económico e ambiental em novas linhas eléctricas.

Em alternativa, têm sido desenvolvidas metodologias que permitem a substituição das atuais metodologias de análise estática da capacidade máxima admissível das linhas eléctricas aéreas (LA) por metodologias de análise dinâmica da capacidade das mesmas, usualmente designada por *Dynamic Line Rating* (DLR). Com esta metodologia é possível avaliar em tempo real, e de uma forma mais realista a capacidade das LAs, o que resulta numa abordagem técnico-económica mais sustentável para *i)* lidar com situações de congestionamento e *ii)* acomodar os valores de capacidade renovável estabelecidos nos planos nacionais para as próximas décadas.

Para a aplicação de metodologias de DLR, sem recorrer a uma rede dispendiosa e invasiva de sensores nas linhas eléctricas, surge a necessidade de caracterizar com elevada precisão os parâmetros meteorológicos mais relevantes para aplicação desta metodologia, nomeadamente, a velocidade e direcção do vento, que segundo vários autores, são os principais fatores no balanço térmico das LAs. Desta forma, de modo a aumentar a precisão e exatidão dos resultados da avaliação do escoamento atmosférico, e tendo em conta as capacidades de resolução espaciotemporais inerentes dos modelos de mesoescala e microescala, é possível proceder-se ao acoplamento (*coupling*) destes modelos.

Nesta dissertação é realizado o desenvolvimento, calibração e validação de uma metodologia de acoplamento usando como caso de estudo dois vãos de LA “virtuais” com o intuito de fornecer a velocidade e direcção do vento necessárias para alimentar com a máxima precisão possível uma ferramenta operacional de DLR. O desenvolvimento desta metodologia recorre a testes de sensibilidade entre *i)* o acoplamento de um modelo de mesoescala, e um modelo de microescala não linear de dinâmica de fluidos computacionais (*computational fluid dynamics* - CFD), e de *ii)* diferentes parametrizações disponíveis no modelo CFD. Assim, o principal objetivo desta dissertação passa pela identificação da configuração mais adequada do acoplamento, incluindo as parametrizações do modelo CFD, que permita a redução dos erros na avaliação do velocidade e direcção do vento para o caso específico em análise. O acoplamento foi realizado através da utilização de séries virtuais e de condições iniciais e de fronteira do modelo de mesoescala.

Com este trabalho é possível concluir importância e vantagem do acoplamento entre modelos para suprimir algumas dificuldades dos modelos de mesoescala para simular fenómenos locais, perceptível através da comparação entre os RMSE do modelo de mesoescala –  $2.1\text{ ms}^{-1}$ , e da melhor configuração –  $1.5\text{ ms}^{-1}$ , pertencente ao método de acoplamento através de séries virtuais. Finalmente, entre as duas formas de introdução de dados de mesoescala, conclui-se que a abordagem de aninhamento (*nesting*) entre modelos, isto é, a introdução de condições iniciais e de fronteira a partir de modelos de mesoescala tende a aumentar erros das métricas avaliadas.

A abordagem de acoplamento permite uma avaliação com mais precisão do escoamento atmosférico em qualquer cota dentro da camada limite atmosférica, captando os efeitos orográficos e da rugosidade no escoamento, em comparação com o uso de apenas informação dos modelos de mesoescala.

**Palavras-Chave:** Linhas eléctricas aéreas, *Dynamic Line Rating* (DLR), Acoplamento, WindSim, Dinâmica de fluidos computacionais (CFD).

## Abstract

The increasing integration of decentralized renewable energies in the energy mix raises new challenges to the operation and planning of the electric networks of energy transportation and distribution. In particular, the operation of electrical power lines with load levels very close to their thermal limits begins to become an increasingly frequent phenomenon. The traditional approach to solving this challenge involves the time-consuming and costly economic and environmental investment in new power lines.

Alternatively, methodologies that allow the replacement of current static analysis methodologies for the assessment of the maximum allowable capacity of overhead power lines (OHL) by a dynamic analysis of their capacity, usually called dynamic line rating (DLR) have been developed. With DLR is possible to evaluate, in real time, and in a more realistic way, the capacity of the LA leading to a sustainable technical-economic approach to *i*) deal with congestion situations and *ii*) accommodate the renewable capacity values established in the national plans for the coming decades.

For the application of DLR methodologies, without resorting to an expensive and invasive network of sensors in the electric lines, it is crucial to characterize with high precision the most relevant meteorological parameters for the application of this methodology, namely, the wind speed and direction. According to several authors, these two parameters are the main factors in the conductors' thermal balance of OHLs. Thus, to increase the precision and accuracy of the atmospheric flow evaluation, it is possible to proceed to the mesoscale-microscale coupling (coupling) considering the spatiotemporal resolution capabilities associated to each numerical model.

In this dissertation, the development, calibration and validation of a coupling methodology are carried out using two “virtual” OHLs as a case study in order to provide the wind speed and direction necessary to feed a DLR operational tool with the greatest possible precision. The development of this methodology resorts to sensitivity tests between *i*) different coupling approaches of a mesoscale model with a nonlinear microscale model based on computational fluid dynamics (CFD), and *ii*) different parameterizations available in the CFD model. Thus, the main objective of this dissertation is to identify the most appropriate configuration of the coupling, including the parameterization of the CFD model, which allows the reduction of errors in the evaluation of wind speed and direction for the specific case under analysis. The coupling was performed using virtual series and initial and boundary conditions of the mesoscale model.

With this work, it is possible to conclude the importance and advantage of the coupling approach to suppress some difficulties of the mesoscale models to simulate local phenomena, perceived through the comparison between the RMSE of the mesoscale model –  $2.1 \text{ ms}^{-1}$ , and the best configuration –  $1.5 \text{ ms}^{-1}$ . Finally, between the two forms of coupling the mesoscale data, it is concluded that the nesting between models, that is, the introduction of initial and boundary conditions from mesoscale models, tends to increase the deviation between the values observed and simulated.

Compared to using only information from the mesoscale models, the results highlight that the coupling approach allows a more accurate assessment of atmospheric flow at any elevation within the atmospheric boundary layer by capturing the orographic effects and the roughness in the flow.

**Keywords:** Overhead power lines, Dynamic Line Rating (DLR), Coupling, WindSim, Computational fluid dynamics (CFD).

# Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	ii
Abstract .....	iii
Índice de Figuras .....	vi
Índice de Tabelas.....	xi
Siglas e Acrónimos.....	xii
Capítulo 1 – Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	1
1.2. <i>Dynamic Line Rating</i> – Panorama atual .....	2
1.3. Revisão dos métodos de avaliação da velocidade e direção (recurso eólico).....	5
1.4. Objetivos .....	6
1.5. Organização da dissertação .....	7
Capítulo 2 – Escoamento atmosférico.....	8
2.1. Circulação atmosférica global .....	8
2.2. Circulações atmosféricas locais.....	9
2.2.1. Brisa marítima .....	10
2.2.2. Brisa vale e montanha .....	11
2.2.3. Depressão térmica da Península Ibérica .....	11
2.2.4. Escoamento sobre montanhas/perturbações topográficas .....	12
2.3. Caracterização da camada limite atmosférica .....	14
2.3.1. Fundamentos .....	14
2.3.2. Perfil de velocidades médias .....	15
2.3.3. Turbulência atmosférica .....	16
2.4. Modelos de turbulência .....	18
2.4.1. Fundamentos .....	18
2.4.2. Standard k-e model.....	19
2.4.3. RNG k-e model .....	21
2.4.4. K-o model of Wilcox.....	22
Capítulo 3 – Análise dinâmica da capacidade de transporte de linhas aéreas.....	24
3.1. Introdução.....	24
3.2. Modelos dinâmicos.....	25
3.3. Influência dos parâmetros na análise DLR.....	26
Capítulo 4 – Metodologia.....	29
4.1. Análise do modelo de microescala.....	29

4.2. Calibração do modelo <i>WindSim</i> .....	30
4.2.1. Módulo <i>Terrain</i> .....	31
4.2.2. Módulo Wind Fields.....	32
4.2.3. Módulo <i>Objects</i> – Introdução das séries virtuais.....	38
4.3. Avaliação do desempenho das diferentes configurações analisadas .....	40
4.4. Caracterização das campanhas experimentais.....	41
Capítulo 5 – Caso de estudo .....	43
5.1. Contextualização .....	43
5.2. Campanha experimental, base de dados e procedimentos aplicados aos dados .....	45
5.3. LA virtuais.....	48
5.3.1. Critérios para a criação das LAs virtuais.....	48
5.3.2. Estações e alturas consideradas em cada LA.....	49
Capítulo 6 – Resultados.....	52
6.1. Análise dos dados da campanha experimental .....	52
6.2. Análise dos resultados para as diferentes configurações do modelo <i>WindSim</i> .....	54
6.2.1. Séries virtuais – dependência do plano horizontal (xy).....	55
6.2.2. Séries virtuais – dependência do plano vertical (z) .....	64
6.2.3. Síntese resultados - configuração do modelo .....	69
6.3. Análise dos resultados para a técnica de <i>nesting</i> usando condições iniciais e fronteira do modelo de mesoescala.....	72
6.3.1. Síntese resultados – acoplamento.....	74
Capítulo 7 – Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	76
Referências Bibliográficas .....	78
Anexo I – Definição da localização de diferença mínima entre o terreno do modelo MM5 e <i>WindSim</i>	83
Anexo II – Design de linhas aéreas .....	85
Anexo III – Descrição do software <i>WindSim</i> .....	86
Anexo IV – Esquema global da metodologia.....	95
Anexo V – Análise horária dos dados reais.....	96
Anexo VI – Rotinas em ambiente Matlab .....	100
Anexo VII – Análise impacto séries virtuais.....	104
Anexo VIII – Análise técnica de agrupamento SOM.....	106

## Índice de Figuras

Figura 1-1: Consumo e produção energéticos em território nacional [18].	2
Figura 1-2: Metas definidas pelo PNEC do contributo das renováveis no consumo de electricidade [5].	3
Figura 1-3: Inutilização da capacidade das LA que pode ser desbloqueada através da DLR [10].	4
Figura 2-1: Esquema da circulação atmosférica global de acordo com o modelo de Hadley [32].	8
Figura 2-2: Esquema da circulação atmosférica global de acordo com o modelo de Ferrel [24].	9
Figura 2-3: Escalas do escoamento atmosférico [24].	10
Figura 2-4: Brisa marítima e terrestre [35].	10
Figura 2-5: Brisa de vale e montanha [38].	11
Figura 2-6: Depressão da Península Ibérica [39].	12
Figura 2-7: Escoamento sobre colinas para diferentes números de Froude [37].	13
Figura 2-8: Representação da CLA [24].	14
Figura 2-9: Efeito da rugosidade aerodinâmica na CLA.	15
Figura 3-1: Preços da energia eléctrica com o aumento da capacidade das linhas em função dos preços históricos na Finlândia [13].	25
Figura 3-2: Variação na análise dinâmica de linhas aéreas como consequência da velocidade do vento, direcção do vento, temperatura ambiente e irradiação solar [10].	27
Figura 3-3: Análise de um período com vento e geração eólica, e um período sem vento e sem geração [20].	27
Figura 4-1: Esquema da metodologia da presente dissertação.	29
Figura 4-2: Estrutura modular do software WindSim.	30
Figura 4-3: Metodologia da calibração do modelo WindSim.	30
Figura 4-4: Metodologia da aquisição/conversão do ficheiro gws.	31
Figura 4-5: Metodologia para a simulação do módulo Terrain.	32
Figura 4-6: Propriedades necessárias na calibração do módulo Terrain para a resolução da malha de 30 metros.	32
Figura 4-7: Propriedades definidas na calibração do módulo Wind Fields recorrendo ao modelo K-o.	33
Figura 4-8: Modelos de turbulência avaliados e combinações de simulações.	33
Figura 4-9: Metodologia de acoplamento usando os dados do modelo de mesoescala.	34
Figura 4-10: Exemplo do domínio de mesoescala que contém o domínio de microescala.	34
Figura 4-11: Metodologia principal da técnica SOM. Os dados das componentes u e v do vento são obtidos do modelo de mesoescala para as alturas e localizações das estações existentes.	35
Figura 4-12: Exemplo do formato xyz. A primeira linha indica o número de pontos do domínio nas diferentes dimensões x, y e z, respetivamente. As restantes linhas correspondem aos dados ordenados de acordo com a lista em baixo.	36
Figura 4-13: Exemplo do formato dws.	36
Figura 4-14: Metodologia completa da fase de calibração do método de acoplamento.	37
Figura 4-15: Propriedades definidas na calibração do módulo Wind Fields para o método de acoplamento.	37
Figura 4-16: Sequência de metodologia da avaliação da influência das séries virtuais nos resultados do caso de estudo.	38
Figura 4-17: Hipóteses analisadas no plano xy para entrada das séries virtuais. Mais detalhes sobre o método DM podem ser consultados no anexo I.	38
Figura 4-18: Combinações das simulações dos parâmetros avaliados.	39
Figura 4-19: Propriedades definidas na calibração do módulo Energy.	39
Figura 4-20: Alturas acima do nível médio do solo de entrada das séries virtuais.	39
Figura 4-21: Exemplo ilustrativo da envoltória convexa	40

Figura 4-22: Histograma da estação (TNW 16) com menor disponibilidade de dados.....	41
Figura 4-23: Histograma da estação (TNW 3) com maior disponibilidade de dados. ....	41
Figura 4-24: Rosa-dos-ventos da estação (TNW 16) com menor disponibilidade de dados.....	42
Figura 4-25: Rosa-dos-ventos da estação (TNW 3) com maior disponibilidade de dados. ....	42
Figura 5-1: Cota do terreno (em metros) disposição geográfica das estações /meteorológicas do caso de estudo do Perdigão – círculos brancos [16]. Indicação das LAs consideradas – linha vermelha.....	43
Figura 5-2: Orografia do caso do estudo do Perdigão, e esquema dos escoamentos atmosféricos típicos [16]. ....	44
Figura 5-3: Fenómenos cateterísticos do escoamento atmosférico da região do Perdigão [16].....	45
Figura 5-4: Pior caso de disponibilidade de dados estação TNW 13 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente). ....	46
Figura 5-5: Melhor caso de disponibilidade de dados, estação TNW 3 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente). ....	46
Figura 5-6: Metodologia de cálculo da média horária da direção do vento. $\angle$ representa a direção do vento. ....	47
Figura 5-7: Metodologia do cálculo da média horária da intensidade do vento.....	48
Figura 5-8: Premissas para a escolha das estações e alturas de medição para a avaliação dos pontos de validação, i.e., LA virtuais. ....	48
Figura 5-9: Perfil vertical da LA Sul: Localização e alturas de medição disponíveis em cada estação – traços preto, “+” localização estabelecida para os postes da LA que se encontra representada a azul. ....	49
Figura 5-10: Perfil vertical da LA Norte: Localização e alturas de medição disponíveis em cada estação – traços preto, “+” localização estabelecida para os postes da LA que se encontra representada a azul. ....	49
Figura 5-11: Disposição final das estações anemométricas da LA Sul. ....	50
Figura 5-12: Disposição final das estações anemométricas da LA Norte. ....	51
Figura 6-1: Disposição geográfica das estações na região de estudo em ambiente WindSim. ....	52
Figura 6-2: Histograma da velocidade do vento para as estações TNW 3, TNW 7, TSE 7 e TSE 11 no horizonte temporal 16/05/2017 a 06/06/2017.....	53
Figura 6-3: Séries temporais da velocidade do vento das estações anemométricas TNW 3 e TNW 7 no horizonte temporal 16/05/2017 a 06/06/2017.....	53
Figura 6-4: Séries temporais da velocidade do vento das estações anemométricas TSE 7 e TSE 11 no horizonte temporal 16/05/2017 a 06/06/2017.....	53
Figura 6-5: Perfil de direção do vento da estação anemométrica TNW 3 no horizonte temporal 16/05/2017 a 06/06/2017.....	54
Figura 6-6: Perfil de direção do vento da estação anemométrica TNW 7 no horizonte temporal 16/05/2017 a 06/06/2017.....	54
Figura 6-7: Perfil de direção do vento da estação anemométrica TSE 7 no horizonte temporal 16/05/2017 a 06/06/2017.....	54
Figura 6-8: Perfil de direção do vento da estação anemométrica TSE 11 no horizonte temporal 16/05/2017 a 06/06/2017.....	54
Figura 6-9: Diagrama de caixa e bigodes dos valores do viés (de todos os pontos de validação) da velocidade do vento.....	55
Figura 6-10: Diagrama de caixa e bigodes dos valores da componente u da velocidade do vento.....	56
Figura 6-11: Diagrama de caixa e bigodes dos valores da componente v da velocidade do vento.....	57
Figura 6-12: RMSE da velocidade do vento. ....	58
Figura 6-13: RMSE da componente u velocidade do vento.....	58
Figura 6-14: RMSE da componente v velocidade do vento.....	58
Figura 6-15: Envoltória convexa dos métodos de introdução das séries virtuais.....	59



Figura 6-16: Diagrama de caixa e bigodes dos valores dos desvios da componente u da velocidade do vento para as diferentes resoluções de simulação da configuração: i) DM; ii) K-o. ....	60
Figura 6-17: Diagrama de caixa e bigodes dos desvios da componente v da velocidade do vento para as diferentes resoluções de simulação da configuração DM/K-o. ....	60
Figura 6-18: Perfis (real, mesoescala, 10/K-o/DM e 30/K-o/DM) da velocidade do vento da estação anemométrica TNW 7 no horizonte temporal 16/05/2017 a 06/06/2017. ....	61
Figura 6-19: Perfis (real, mesoescala, 10/K-o/DM e 30/K-o/DM) da velocidade do vento da estação anemométrica TSE 7 no horizonte temporal 16/05/2017 a 06/06/2017. ....	62
Figura 6-20: Perfil da orientação do vento simulado (10/K-o/DM) da estação anemométrica TNW 3.62	
Figura 6-21: Perfil da orientação do vento simulado (30/K-o/DM) da estação anemométrica TNW 3.62	
Figura 6-22: Perfil da orientação do vento simulado (10/K-o/DM) da estação anemométrica TNW 7 63	
Figura 6-23: Perfil da orientação do vento simulado (30/K-o/DM) da estação anemométrica TNW 7.63	
Figura 6-24: Perfil da orientação do vento simulado (10/K-o/DM) da estação anemométrica TSE 7.. 63	
Figura 6-25: Perfil da orientação do vento simulado (30/K-o/DM) da estação anemométrica TSE 7.. 63	
Figura 6-26: Perfil da orientação do vento simulado (10/K-o/DM) da estação anemométrica TSE 11.63	
Figura 6-27: Perfil da orientação do vento simulado (30/K-o/DM) da estação anemométrica TSE 11.63	
Figura 6-28: Diagrama de caixa e bigodes dos valores da velocidade do vento. ....	64
Figura 6-29: Diagrama de caixa e bigodes dos valores da componente u da velocidade do vento. ....	65
Figura 6-30: Diagrama de caixa e bigodes dos valores da componente v da velocidade do vento. ....	66
Figura 6-31: RMSE da velocidade do vento. ....	66
Figura 6-32: RMSE da componente u da velocidade do vento. ....	67
Figura 6-33: RMSE da componente v da velocidade do vento. ....	67
Figura 6-34: Envoltória convexa dos métodos de introdução das séries virtuais. ....	68
Figura 6-35: Perfis (real, mesoescala, 32 metros, 80 metros e 598 metros) de velocidade do vento da estação anemométrica TNW 7 no horizonte temporal 16/05/2017 a 06/06/2017 e malha de resolução de 10 metros. ....	69
Figura 6-36: Perfis (real, mesoescala, 32, 80 e 598 metros) de velocidade do vento da estação anemométrica TNW 7 no horizonte temporal 16/05/2017 a 06/06/2017 e malha de resolução com 30 metros. ....	69
Figura 6-37: Viés (normalizado pela intensidade média do vento) e RMSE da configuração selecionada em termos geográficos da LA Sul. ....	70
Figura 6-38: Viés (normalizado pela intensidade média do vento) e RMSE da configuração selecionada em termos geográficos da LA Norte. ....	71
Figura 6-39: Diagrama de caixa e bigodes dos desvios dos valores da velocidade do vento para a formulação do modelo de microescala selecionada e do modelo de mesoescala. No topo de cada figura apresenta-se o valor do RMSE de cada aproximação. ....	71
Figura 6-40: Diagrama de caixa e bigodes dos desvios dos valores da velocidade e componentes do vento da técnica de acoplamento. ....	72
Figura 6-41: Envoltória convexa da técnica usando os dados reais e as diferentes configurações testadas. ....	73
Figura 6-42: Perfis (real, acoplamento, 30/K-o/DM (séries virtuais), mesoescala) de velocidade do vento da estação anemométrica TNW 7 no horizonte temporal 16/05/2017 a 06/06/2017. ....	74
Figura 6-43: Perfis verticais do vento obtidos a partir dos dados de mesoescala, para as fronteiras do domínio de microescala. ....	74
Figura 6-44: RMSE e diagrama de caixa e bigodes dos valores do desvio da velocidade do vento para a técnica de acoplamento, séries virtuais (30/K-o/DM) e modelo de mesoescala. ....	75
Figura I- 1: Malha e cotas em metros do modelo de mesoescala em ambiente Surfer. ....	83
Figura I- 2: Malha e cotas em metros do modelo microescala em ambiente Surfer. ....	83

Figura I- 3: Subtração entre as cotas, em metros, das malhas de microescala e mesoescala em ambiente Surfer. Indicação do ponto DM – ponto vermelho e do ponto PM – ponto rosa.....	84
Figura IV- 1: Esquema total da metodologia aplicada na presente dissertação. ....	95
Figura V- 1: Disponibilidade dos dados estação TNW 1 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).....	96
Figura V- 2: Disponibilidade dos dados estação TNW 2 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).....	96
Figura V- 3: Disponibilidade dos dados estação TNW 3 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).....	96
Figura V- 4: Disponibilidade dos dados estação TNW 4 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).....	96
Figura V- 5: Disponibilidade dos dados estação TNW 5 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).....	96
Figura V- 6: Disponibilidade dos dados estação TNW 6 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).....	96
Figura V- 7: Disponibilidade dos dados estação TNW 7 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).....	96
Figura V- 8: Disponibilidade dos dados estação TNW 8 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).....	96
Figura V- 9: Disponibilidade dos dados estação TNW 9 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).....	97
Figura V- 10: Disponibilidade dos dados estação TNW 10 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).....	97
Figura V- 11: Disponibilidade dos dados estação TNW 11 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).....	97
Figura V- 12: Disponibilidade dos dados estação TNW 12 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).....	97
Figura V- 13: Disponibilidade dos dados estação TNW 13 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).....	97
Figura V- 14: Disponibilidade dos dados estação TNW 14 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).....	97
Figura V- 15: Disponibilidade dos dados estação TNW 15 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).....	97
Figura V- 16: Disponibilidade dos dados estação TNW 16 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).....	97
Figura V- 17: Disponibilidade dos dados estação TSE 1 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).....	98
Figura V- 18: Disponibilidade dos dados estação TSE 2 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).....	98
Figura V- 19: Disponibilidade dos dados estação TSE 3 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).....	98
Figura V- 20: Disponibilidade dos dados estação TSE 4 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).....	98
Figura V- 21: Disponibilidade dos dados estação TSE 5 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).....	98
Figura V- 22: Disponibilidade dos dados estação TSE 6 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).....	98

Figura V- 23: Disponibilidade dos dados estação TSE 7 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).....	98
Figura V- 24: Disponibilidade dos dados estação TSE 8 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).....	98
Figura V- 25: Disponibilidade dos dados estação TSE 9 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).....	99
Figura V- 26: Disponibilidade dos dados estação TSE 10 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).....	99
Figura V- 27: Disponibilidade dos dados estação TSE 11 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).....	99
Figura VII- 1: Formatação da série virtuais de análise do impacto das séries virtuais. ....	104
Figura VII- 2: Análise do impacto das séries virtuais. Série corrigida (linha azul), série referência (linha vermelha), série virtual (linha amarela) e fatores de correção (linha/área violeta). ....	104
Figura VII- 3: Fatores de correção em função da direção do vento. ....	105
Figura VIII- 1: Diagrama de caixa e bigodes dos valores da velocidade do vento para a técnica SOM. ....	106
Figura VIII- 2: Dispersão das componentes do vento para a técnica de SOM.....	106

## Índice de Tabelas

Tabela 2-1: Classificação dos modelos de turbulência com base no número de equações [45].....	19
Tabela 5-1: Estações consideradas na LA Sul.....	50
Tabela 5-2: Estações consideradas na LA Norte.....	50
Tabela 6-1: Características seleccionadas da configuração do modelo microescala com melhor desempenho.....	70

## Siglas e Acrónimos

CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CIGRE	International Council for Large Electric Systems
CLA	Camada Limite Atmosférica
CLE	Camada Limite Estável
CLI	Camada Limite Instável
CLN	Camada Limite Neutra
DLR	<i>Dynamic Line Rating</i>
DM	Diferença mínima
DNS	Simulação Direta Numérica
GEE	Gases de Efeito Estufa
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LA	Linhas Aéreas
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
MEV	<i>Eddy Viscosity Model</i>
MM5	<i>Fifth-Generation Mesoscale Model</i>
MRS	<i>Reynolds Stress Model</i>
NEWA	<i>New European Wind Atlas</i>
OST	Operador do sistema de transmissão
PER	Produção Energética Renovável
PM	Ponto Médio
PNEC	Plano Nacional Energia e Clima 2030
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier Stokes equations</i>
RNC	Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050
RNG	<i>Renormalization Group</i>
SCE	Subcamada Exterior
SCL	Subcamada Logarítmica
ZITC	Zona Intertropical de Convergência

# Capítulo 1 – Introdução

## 1.1. Enquadramento

Mundialmente, o setor eólico sofreu um grande desenvolvimento, entre os anos de 2000 e 2018. Notavelmente, a capacidade eólica instalada aumentou aproximadamente 25% no mesmo período [1], perfazendo sensivelmente 5% da produção energética Mundial no ano de 2018 (1123 TWh) [2].

Com intuito de promover a capacidade eólica em Portugal, a avaliação deste recurso no seu território é de importantíssima realização. Sabendo-se inclusivamente, que muito dos locais mais apropriados para exploração se encontram já em exploração, e que grande parte dos restantes locais não se coadunam com este tipo de indústria devido aos planos nacionais de ambiente e de uso do solo [3], [4], a caracterização precisa da sua fonte primária - intensidade do vento, é então uma necessidade para o desenvolvimento viável e contínuo desta indústria em Portugal, permitindo-se assim o cumprimento, ou suplantação, das metas impostas no Plano nacional energia e clima (PNEC) 2030 e roteiro para a neutralidade carbónica (RNC) 2050 [5], [6].

Este futuro promissor do setor eólico é apenas alcançável se os erros associados às presentes metodologias de avaliação do potencial eólico, que tendem a sobrestimar a produção das centrais eólicas, forem minimizados [7]. Estas incertezas levam a potenciais perdas de rentabilidade económica por parte dos produtores, e, consequentemente, à redução da expansão deste setor. Por outro lado, a integração em larga escala de fontes de energia com comportamento estocástico, como a energia eólica, nas matrizes energéticas de grande parte dos países desenvolvidos acarreta novos desafios para os operadores dos sistemas electroprodutores no equilíbrio no binómio procura/oferta [8].

Assim, outro desafio associado à introdução da energia eólica passa pela introdução de grandes quantidades de energia, cuja a produção é, tipicamente, descentralizada, podendo introduzir problemas de congestionamento nas linhas eléctricas da rede de transporte, mas também na rede de distribuição [9]. Contudo, o escoamento atmosférico não só contribui para o aumento da carga nas linhas eléctricas, por via da geração eólica, mas também, no caso das linhas aéreas, para o aumento da capacidade de transporte das mesmas devido ao arrefecimento por convecção dos condutores [10]. Desta forma, através da substituição das atuais metodologias de análise estática da capacidade máxima admissível das linhas aéreas (LA), que recorrem a valores sazonais conservativos das variáveis climatéricas no balanço térmico das mesmas, por uma metodologia de análise dinâmica da capacidade das linhas aéreas (usualmente designada por *Dynamic Line Rating* - DLR), é possível avaliar em tempo real, e de uma forma mais realista, a capacidade das linhas de transporte e distribuição resultando numa abordagem técnico-económica sustentável para lidar com situações de congestionamento. De acordo com vários autores, o uso da análise DLR permite aumentar a capacidade de transmissão, adiando o oneroso reforço das redes permitindo aumentar a penetração da produção energética renovável [11].

Com a evolução dos recursos computacionais, foi possível a introdução de ferramentas computacionais que permitem a simulação do escoamento atmosférico com as suas variações espaciotemporais com elevada resolução permitindo de acordo com [12] e [13], o correto dimensionamento dos parques eólicos e, consequentemente, a redução do investimento inicial dos mesmos em locais com orografias complexas.

Note-se, contudo, que o setor eólico continua a recorrer a modelos de microescala lineares na avaliação do recurso eólico. Porém devido às lacunas inerentes destes modelos [14], as avaliações tornam-se insuficientemente precisas para a caracterização de fenómenos locais relevantes para aplicações

específicas, como é o caso da análise DLR [15]. Assim, a presente dissertação foca-se no processo de acoplamento entre um modelo de mesoescala e um modelo de microescala baseado em CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Isto porque, para além de se possibilitar colmatar algumas lacunas dos modelos de microescala, e.g., captarem fenómenos mesoescala do escoamento atmosférico [12], estes conseguem fornecer soluções lineares e não lineares em escalas adequadas com as das turbinas eólicas e LA, especialmente em terrenos de maior complexidade a nível morfológico. Assim, recorrendo a um caso de estudo, pretende-se identificar a melhor configuração para realizar este acoplamento e quantificar os erros associados a diferentes configurações de acoplamento entre estes dois modelos.

Face aos benefícios da análise DLR, o caso de estudo incide sobre a caracterização do recurso (intensidade e direção do vento) em linhas aéreas virtuais definidas para uma região de Portugal que beneficiou de uma campanha experimental com um conjunto alargado de estações meteorológicas e anemométricas - experiência da Serra do Perdigão [16]. Contudo, o trabalho desenvolvido pode ser igualmente aplicado para aplicações do setor eólico. Em suma, o presente trabalho contribui igualmente para um aprofundamento da caracterização com precisão das condições do escoamento eólico no território nacional.

## 1.2. *Dynamic Line Rating* – Panorama atual

A produção elétrica atual no território nacional, como é possível inferir através da Figura 1-1, é essencialmente descentralizada. Inclusivamente em termos futuros, e pese embora o papel dos *prosumers* seja relevante, a tendência passa pelo o alargamento da descentralização da produção devido ao aumento da produção de origem em tecnologias renováveis (eólica e solar fotovoltaica) que possui uma inerente dispersibilidade em termos geográficos [17]. Relativamente à relação entre as localizações geográficas das zonas de produção e consumo energético observa-se, igualmente pela Figura 1-1, que existe uma elevada assimetria entre estas, dificultando a manutenção e monitorização da rede de interligação (transporte/distribuição).

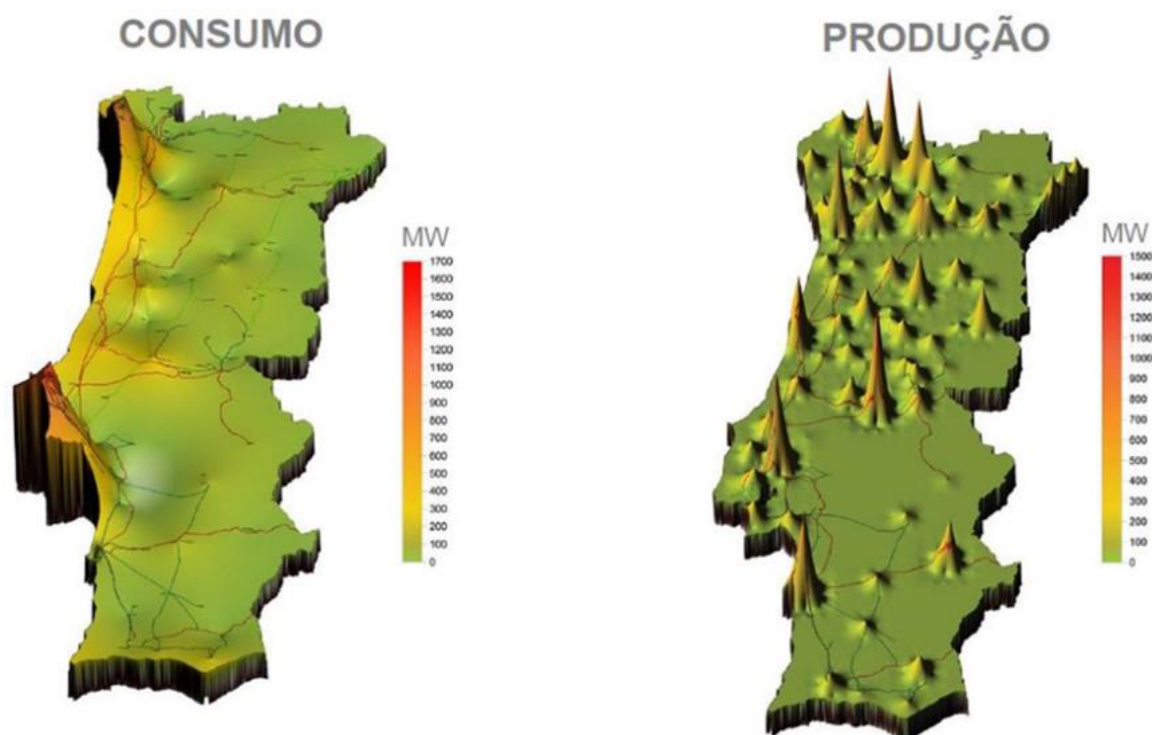


Figura 1-1: Consumo e produção energéticos em território nacional [18].

Devido ao atual paradigma da geração elétrica ocorrem problemas na rede, incapazes de serem ultrapassados através do *design* e gestão convencionais [10]. Especialmente, devido à produção com origem em geração renovável, que por possuir um carácter não despachável e de elevada dispersibilidade espacial, tipicamente afastada dos grandes centros de consumo, pode induzir problemas como congestionamento e estrangulamento da rede elétrica de transporte e distribuição.

As limitações de potência transmitida nas linhas são induzidas por motivos de segurança na distância entre as linhas e superfície terrestre (*clearance*), e integridade estrutural das linhas [9]. Note-se que, a capacidade máxima injetada na rede é limitada pela ampacidade máxima das LA, isto é, a corrente máxima que é possível transportar no condutor obedecendo ao *design* e critérios de segurança do mesmo, nomeadamente a sua temperatura.

Esta problemática pode ser ultrapassada através da alteração (*uprating*)/instalação de linhas de transmissão ou limitando a produção energética renovável (PER) durante alguns períodos (processo usualmente designado por *curtailment*). Desta forma introduz-se impactos negativos a nível económico, com a necessidade de elevados investimentos na remodelação da rede, e ambiental, como o aumento de emissões de gases de efeito de estufa (GEE) devido à necessidade de recurso a fontes de geração não renováveis localizadas em pontos da rede elétrica não congestionada [10].

Estes problemas atuais têm tendência a agravar-se no futuro devido ao aumento da geração renovável, agravando a dificuldade da gestão da rede elétrica nacional por parte dos operadores dos sistemas de transmissão (OST's) e distribuição [9], [19]. Devido às problemáticas e inerentes limitações anteriormente descritas, a rede elétrica de transporte pode limitar o cumprimento das metas impostas no PNEC não permitindo maximizar penetração da PER no consumo final de energia elétrica. De acordo com o PNEC será feito o reforço da rede de modo a suplantiar todos estes problemas. Contudo, através da introdução da DLR pode evitar-se esse elevado e moroso investimento [20], somente desbloqueando a capacidade de transmissão latente das LA existentes [11].

Assim, para atingir as metas para o contributo das renováveis no consumo de eletricidade presentes na Figura 1-2, até 2030 [5], o DLR apresenta-se como uma solução capaz de simplificar todo o processo. Não só pelo desbloquear de zonas potencialmente congestionadas, mas também, por a escala temporal do construção de novos troços da rede elétrica ser superior à necessária para a construção de novos parques eólicos e solar fotovoltaicos [20].

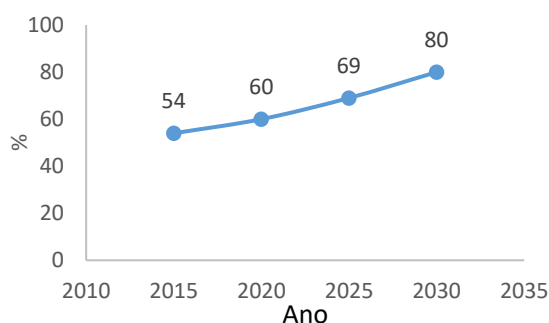


Figura 1-2: Metas definidas pelo PNEC do contributo das renováveis no consumo de eletricidade [5].

Na atualidade, os OST's recorrem a modelos numéricos estacionários que avaliam a ampacidade máxima dos condutores em equilíbrio térmico para condições atmosféricas pré-definidas que são, em muitas situações, bastante conservativas [10] - velocidades do vento reduzidas ( $0.6 \text{ ms}^{-1}$ ), radiação solar máxima ( $1000 \text{ Wm}^{-2}$ ) e temperaturas ambiente elevadas ( $40^\circ\text{C}$ ) [20]. Nestes modelos estacionários, as condições atmosféricas são assumidas constantes sazonalmente, o que leva a um inerente desaproveitamento da capacidade das LA [20]. Este facto é corroborado pela Figura 1-3, pois logicamente, como a temperatura dos condutores não é constante a sua capacidade de transmissão (ampacidade) varia de igual modo [21], [10].



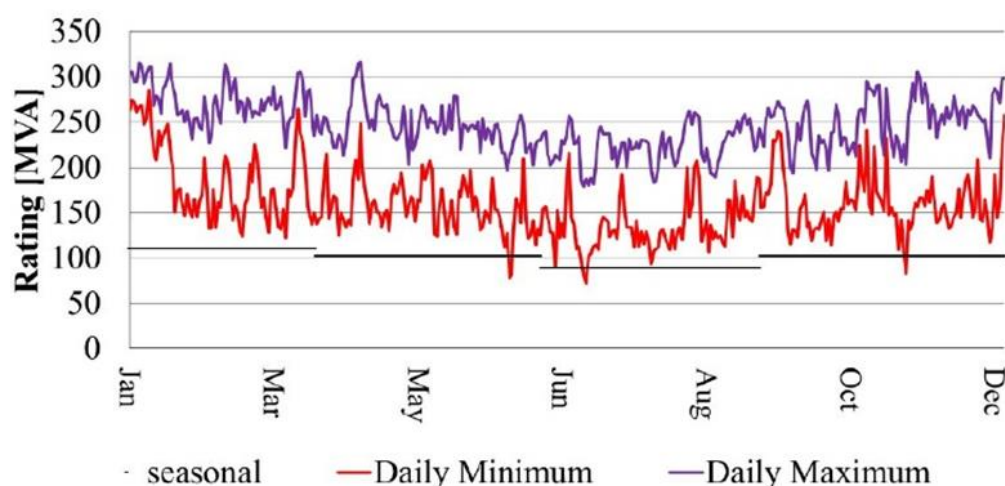


Figura 1-3: Inutilização da capacidade das LA que pode ser desbloqueada através da DLR [10].

Contudo, nas últimas décadas por diversos motivos como por exemplo, o aumento do poder computacional, o interesse em metodologias de DLR tem aumentado. Esta metodologia assume um regime transiente das condições atmosféricas, recorrendo a algoritmos para avaliar dinamicamente a capacidade máxima das LA [11]. Nesta abordagem, ao incluir-se a inércia térmica dos condutores e a sua dependência das condições meteorológicas, é possível uma análise térmica mais realista através da análise dinâmica da temperatura dos mesmos. Entre os complexos modelos de DLR destacam-se o IEEE<sup>a</sup> e CIGRE<sup>b</sup> que se encontram em contínuo desenvolvimento [22].

Segundo vários autores [9], [11], [19], [20], entre as variáveis meteorológicas a que possui maior preponderância no balanço térmico das LA é a velocidade do vento. Sendo que força motora das centrais eólicas é a intensidade do vento, e esta por sua vez acentua o arrefecimento dos condutores através de processos de transferência de calor por convecção. Assim, esta situação traduz-se numa sinergia positiva em termos de produção eólica e a capacidade das linhas. Nesse sentido, o interesse na análise dinâmica das linhas aéreas foi também potenciado pelo crescimento acentuado da produção eólica aliada a sinergia identificada entre o aumento da capacidade devido ao efeito convectivo de arrefecimento provocado pela intensidade do vento [9]. Assim, a introdução da análise dinâmica das linhas aéreas pode representar uma solução tecno-económica vantajosa para o aumento da PER, especialmente da produção eólica [9]. Segundo [15], usando o modelo IEEE é possível aumentar a capacidade da linha em mais de 125% durante 50% do tempo. Complementarmente, os autores salientam que a correlação entre a produção eólica e a capacidade na linha é bastante significativa, superior a 0.7.

Relativamente às diferentes abordagens aplicadas para análise de DLR estas podem ser classificadas como: *i)* indireta – monitorização de parâmetros meteorológicos relevantes como a temperatura, irradiância e velocidade /direção do vento; *e ii)* direta - através da instalação de equipamentos nas LA para adquirir informação sobre tensão dos condutores, flecha, temperatura dos condutores, etc. [20]. A segunda abordagem, reconhecidamente, fornece maior exatidão e precisão em comparação com a abordagem indireta. Contudo, a abordagem direta, baseada em sensores instalados em determinados locais, suscita algumas preocupações, nomeadamente, os desafios para cobrir adequadamente pontos suficientes de uma rede e os onerosos custos de instalação e manutenção destes equipamentos [23]. Os

<sup>a</sup> Institute of Electrical and Electronics Engineers.

<sup>b</sup> International Council for Large Electric Systems.

benefícios das diferentes abordagens e sua aplicação a diferentes casos de estudos são apresentados em [2], [3].

No seguimento do parágrafo anterior, e tendo em conta as dificuldades na aplicação da DLR através da análise indireta recorrendo a parâmetros ambientais [20], na presente dissertação, diferentes métodos de acoplamento entre os dados de um modelo de mesoescala e um modelo de microescala são propostos e avaliados recorrendo a dados observados. Este acoplamento visa a avaliação precisa dos parâmetros do escoamento atmosférico mais preponderantes (velocidade e direção do vento), sem recorrer a uma extensa e onerosa rede de monitorização, para análise DLR junto de duas LAs “virtuais”.

### **1.3. Revisão dos métodos de avaliação da velocidade e direção (recurso eólico)**

A avaliação rigorosa do recurso eólico numa dada região é um passo crucial para a gestão do aproveitamento do recurso eólico como fonte energética. Em termos históricos, a avaliação do recurso eólico para uma escala regional e/ou nacional, era realizada através de um reduzido número de estações complementados com métodos geoestatísticos (interpolações ou correlações semi-empíricas) levando a estimativas com baixa precisão e exatidão [24]. Com a crescente necessidade de avaliação do recurso eólico para diferentes aplicações, surgiu a necessidade de desenvolver novos métodos dotados de maior rapidez e precisão na simulação do escoamento eólico. Segundo [25], que classifica os diferentes métodos de avaliação de escoamento eólico, estes podem ser divididos em modelos lineares e não lineares.

Os modelos lineares têm como vantagem a baixa necessidade de recursos de computação e a avaliação com uma precisão razoável para orografias planas ou com pequenas elevações. No entanto, por serem baseados em soluções linearizadas, assumindo um escoamento estável, das equações de Navier-Stokes, estes atribuem soluções não dinâmicas para as diferentes camadas de escoamento perturbado pela orografia do terreno. De acordo com [26], entre outras limitações, estes modelos falham ao descrever *i)* corretamente o escoamento onde este se separa tornando-se turbulento, e *ii)* processos físicos em diferentes escalas espaciotemporais [27]. Deste modo, os processos físicos não são resolvidos explicitamente sendo necessário recorrer a aproximações/parametrizações que podem induzir imprecisões nos resultados.

Os progressos na modelação numérica conjuntamente com o aumento das capacidades computacionais viabilizaram o desenvolvimento dos modelos não lineares na indústria de simulação de escoamentos e na avaliação do potencial eólico. De entre estes modelos não lineares, no setor eólico destacam-se os modelos de dinâmica de fluidos computacionais (*computational fluid dynamics* - CFD), que permitiram aumentar significativamente a precisão das avaliações do potencial eólico, sobretudo em terrenos complexos [28]. Esta abordagem, quer em locais costeiros ou interiores, com orografias complexas apresentam resultados mais precisos [29]. Deste modo, a inclusão dos efeitos térmicos na estratificação nas simulações em CFD resulta em cálculos com maior precisão.

Uma das abordagens mais comum para mitigar os custos onerosos da instalação e manutenção de estações anemométricas para avaliação do potencial eólico é o recurso aos modelos numéricos de mesoescala. Estes modelos permitem resolver as equações diferenciais que traduzem as leis físicas descrevendo o comportamento dinâmico da atmosfera, com precisão até à resolução espacial máxima de 1x1 km, permitindo obter os parâmetros meteorológicos mais relevantes para a caracterização do recurso eólico, e.g., intensidade e direção do vento [30]. Estes modelos têm a capacidade de descrever fenómenos atmosféricos como o comportamento e propagação das massas de ar e tratar explicitamente,

os fenómenos inerentes da turbulência e estratificação atmosférica. Nos últimos anos verificou-se um incremento significativo nos resultados obtidos com base neste tipo de modelo que têm beneficiado igualmente da instalação de novos equipamentos de observação/medição dos parâmetros meteorológicos resultando na melhoria da sua capacidade de reproduzir as dinâmicas atmosféricas de uma região.

De modo a aumentar a precisão e exatidão dos resultados da avaliação do escoamento eólico e tendo em conta as capacidades de resolução spatiotemporais inerentes dos modelos de mesoescala e microescala, é possível proceder-se ao denominado acoplamento (*coupling*) de modelos. Este método pode ser realizado procedendo-se ao acoplamento e *nesting* da informação de forma unidirecional ou bidirecional entre os diferentes modelos, e em específico neste trabalho, modelos de microescala e mesoescala. Segundo [28], o método acoplamento apresenta-se como uma metodologia segura para avaliação do potencial eólico em qualquer cota dentro da camada limite atmosférica. A precisão desta metodologia é significativamente sensível à complexidade do terreno, logo, para a diminuição dos erros por esta introduzidos é crucial uma discretização adequada do terreno. No mesmo estudo, obteve-se erros próximos de 15%, quer na avaliação da energia anual produzida quer na velocidade média do vento. De acordo com [31], a utilização dos métodos de acoplamento permitiu uma redução do erro em aproximadamente 50 % relativamente à utilização de apenas modelos de mesoescala. Sendo que, para além disso demonstrou que quanto maior a complexidade do terreno a simular maior importância tem o acoplamento entre diferentes modelos de modo a capturar os efeitos da orografia no escoamento do vento e, consequentemente, minimizar os erros na estimativa do escoamento atmosférico.

## 1.4. Objetivos

De acordo com o que foi descrito no enquadramento, o objetivo final da presente dissertação centra-se no desenvolvimento, calibração e avaliação de uma metodologia de acoplamento entre os resultados de um modelo de mesoescala e um modelo de microescala para a caracterização do escoamento atmosférico. Este acoplamento é realizado através de introdução de séries virtuais e condições iniciais e fronteira, obtidas através do modelo de mesoescala *Fifth generation model* (MM5), no modelo CFD WindSim. Esta abordagem, que aplica as boas práticas do setor eólico sempre que possível, visa permitir alimentar com a máxima precisão possível uma ferramenta operacional de análise dinâmica da capacidade máxima admissível das linhas aéreas de transporte/distribuição - DLR.

Relativamente à calibração da metodologia recorre-se a testes de sensibilidade ao método de acoplamento, sendo analisadas apenas as grandezas meteorológicas mais relevantes na análise DLR: velocidade e direção do vento. A avaliação de cada teste é concretizada recorrendo aos dados de uma campanha experimental realizada em Portugal numa zona de orografia complexa. Esta especificação foi realizada tendo em conta a disponibilidade de dados reais do escoamento atmosférico do caso experimental da Serra do Perdigão, que possuem uma disposição geográfica que se pode aproximar ao comportamento típico das LAs, o que possibilita a replicação do método aqui desenvolvido, em outros locais da rede de transporte elétrico nacional.

Com o trabalho desenvolvido nesta dissertação propõe-se que o método antes descrito permita a avaliação correta e precisa dos parâmetros do escoamento atmosférico junto dos vãos da rede elétrica de transporte/distribuição, e assim, suplantando uma das maiores dificuldades/imprecisões na aplicação da análise DLR de modo indireto.

## 1.5. Organização da dissertação

A restante dissertação encontra-se estruturada da seguinte forma. No capítulo 2 é realizada uma descrição do escoamento atmosférico contemplando os seus fundamentos, a circulação de larga escala e os fenómenos de turbulência. O capítulo 3 apresenta um breve estado de arte sobre a análise DLR, em que se aprofunda os seus benefícios para a rede eléctrica de transporte, os seus fundamentos, metodologias e finalmente uma breve análise económica da mesma. Mais especificamente esta análise engloba a avaliação do impacto dos parâmetros meteorológicos, descrição dos principais modelos dinâmicos e análise económica.

O capítulo 4 apresenta a metodologia aplicada no desenvolvimento do método de avaliação do escoamento eólico de acordo com o caso de estudo em análise. Esta compreende diferentes configurações do acoplamento entre o modelo mesoescala e CFD, bem como a identificação da melhor configuração do modelo CFD. Note-se que, esta metodologia foi desenvolvida tendo como base a calibração e validação da mesma para duas LA idealizadas.

No capítulo 5 apresenta-se o caso de estudo em análise nesta dissertação, nomeadamente, a caracterização da região em estudo, isto é, a experiência da Perdigão, e as premissas estabelecidas para definição das duas LAs.

No capítulo 6 apresentam-se os resultados obtidos. A análise dos resultados centra-se na avaliação da metodologia de acoplamento que minimiza o erro na estimativa da intensidade do vento e das componentes longitudinal -  $u$  e meridional -  $v$  da velocidade do vento.

Finalmente, no capítulo 7, os principais resultados são sumarizados, apresentando-se as conclusões obtidas e as sugestões para futuros trabalhos a realizar.

Integram ainda a presente tese os seguintes anexos:

- I. Análise ambiente Surfer – Definição do ponto mínimo entre as cotas dos terrenos dos modelos de mesoescala e microescala.*
- II. Design linhas aéreas – Formulação do design das linhas aéreas, considerando um caso ideal.*
- III. Esquema global da metodologia – Esquematização da metodologia completa utilizada na presente dissertação.*
- IV. Análise horária dos dados reais – Análise horária da disponibilidade dos dados reais.*
- V. Rotinas em ambiente MATLAB – Apresentação das rotinas Matlab para a construção dos ficheiros tws. e xyz.*
- VI. Análise influência das séries virtuais – Análise da influência das séries virtuais no escoamento simulado.*
- VII. Análise impacto séries virtuais – Análise do impacto das séries virtuais (dados de mesoescala) nos dados simulados em CFD.*
- VIII. Análise técnica de agrupamento SOM – Análise de resultados obtidos.*

## Capítulo 2 – Escoamento atmosférico

De uma forma geral o escoamento atmosférico ou vento define-se como um movimento de ar em relação à superfície terrestre, originado pela variação de temperatura atmosférica. Esta variação de temperatura traduz-se numa variação de pressão entre dois pontos à mesma altitude, resultando na deslocação de massas de ar até se atingir um ponto de equilíbrio [24].

O estudo e desenvolvimento do conhecimento sobre a dinâmica do escoamento atmosférico é da maior importância para o desenvolvimento de aplicações eólicas. Neste seguimento, no presente capítulo é apresentada uma descrição sumária do escoamento atmosférico desde os seus fundamentos até a escoamentos de larga escala com escalas horizontais superiores a centenas de quilómetros, verticais com a dimensão da troposfera e temporais na ordem de um dia ou superiores.

### 2.1. Circulação atmosférica global

A circulação no plano vertical da atmosfera terrestre é caracterizada através de sucessivas células. As células de Hadley (Figura 2-1) é um modelo de circulação fechado e unicelular que ocorre nas zonas tropicais em cada hemisfério, sendo que, este movimento ocorre devido a um aquecimento solar diferencial do planeta devido à sua forma esférica [24]. Deste modo, de acordo com a teoria de Hadley, no equador observa-se um forte impacto da radiação solar, consequentemente, ocorre o aumento da temperatura das massas de ar originando uma diminuição da densidade do ar que induz a sua ascensão na atmosfera até à tropopausa, direccionando-se seguidamente para os polos.

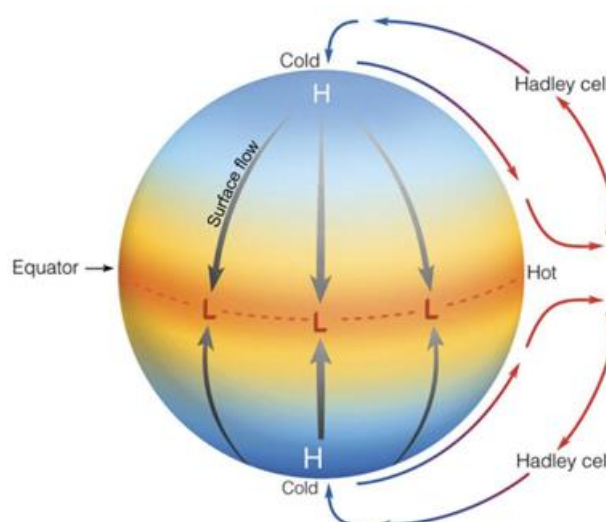


Figura 2-1: Esquema da circulação atmosférica global de acordo com o modelo de Hadley [32].

Em sentido contrário, nos polos devido a um défice radiativo as massas de ar arrefecem e descendem na atmosfera de modo a regressar ao equador. Note-se que este modelo possui três suposições [4]:

- A circulação é constante;
- As massas de ar que circulam na direção dos polos situam-se em altitudes elevadas conservando o seu momento angular, contrariamente, as massas de ar na direção do equador que se situam junto à superfície sendo o seu escoamento desacelerado devido a efeitos de fricção;
- O balanço térmico é a sustentação deste modelo.

Contudo, as premissas do modelo de Hadley apresentam algumas limitações, expostas inicialmente por Brian Ferrel, nomeadamente, que o momento angular não é conservado no movimento das massas de ar direccionadas para os polos, uma vez que, o escoamento atmosférico não possui velocidade suficiente para chegar aos polos [33].

Ferrel formulou, em 1956, um modelo de circulação atmosférica mais complexo, no qual o efeito da rotação terrestre no momento angular das partículas de ar é considerado. Este efeito consiste na força de Coriolis que se caracteriza por, juntamente com a força de atrito e a força centrífuga, atuar sobre um

corpo cujo sistema de referência se encontre em rotação exercendo uma força perpendicular ao plano definido pelo eixo de rotação e pelo vetor de velocidade. Desta forma, a força de Coriolis induz a deslocação de uma partícula de ar para a direita no hemisfério Norte, e para a esquerda no Sul[33].

A Figura 2-2 descreve a circulação atmosférica global em três dimensões. No plano vertical em torno da Terra a circulação é caracterizada três células: as células de Hadley na região tropical de cada hemisfério, as células de Ferrel nas latitudes médias e as células polares. Nas células de Hadley e nas células polares o ar ascende nas zonas equatoriais e polares, comportamento esse, que ocorre de acordo com a energia disponível no sistema, adquirindo essas células a denominação de células diretas. A circulação atmosférica na zona intermédia é descrita através das células de Ferrel que é uma célula altamente turbulenta e indireta [24].

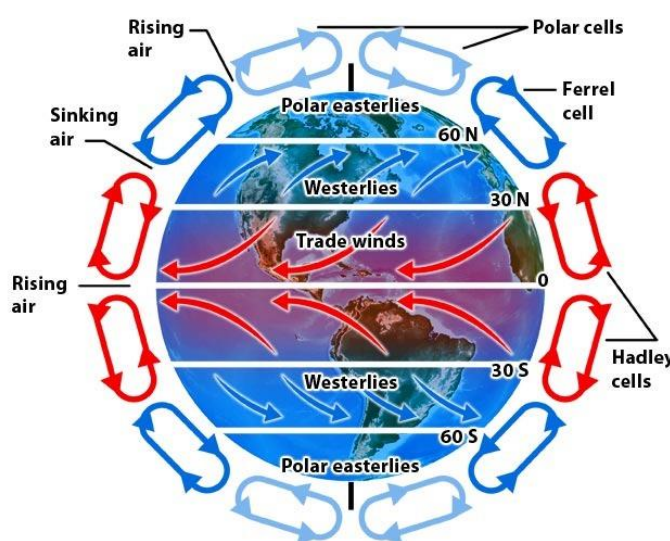


Figura 2-2: Esquema da circulação atmosférica global de acordo com o modelo de Ferrel [24]

Com a introdução deste modelo foi possível explicar características do escoamento atmosférico terrestre como [24]:

- Existência de uma zona de convergência na zona equatorial denominada por Zona Intertropical de Convergência (ZITC). Nesta zona ocorre a geração de uma circulação eólica de Este sobre o equador devido ao efeito de Coriolis designada de ventos alísios.
- Em latitudes subtropicais encontra-se outra zona de convergência próxima da superfície devido a um escoamento atmosférico de Oeste para Este.
- Existência de uma zona de circulação anticiclónica polar junto da superfície.
- Ocorrência de depressões móveis subpolares que possuindo um grande gradiente de temperaturas associado à frente polar. Devido a este forte gradiente ocorrem, nessa região e em alta troposfera, um máximo de escoamento atmosférico denominado de Jato Polar. Ocorre similarmente um Jato Subtropical produzido pelo efeito de Coriolis nos ramos superiores das células de Hadley.

## 2.2. Circulações atmosféricas locais

Nas secções anteriores foram abordados sistemas de escoamento atmosférico em macroescala, isto é, dimensões horizontais de 2000 a 10000 km (Figura 2-3) e escalas temporais de dias/semanas. Contudo, do ponto de vista da “engenharia do vento”, nomeadamente para aplicações do setor eólico e mais recentemente, para a análise DLR, importa compreender e avaliar o comportamento do vento nas camadas inferiores da atmosfera. Nesta camada da atmosfera, é possível identificar a geração de circulações locais de vento associadas a: *i*) contrastes entre a superfície terrestre/mar e montanha/vale, *ii*) condicionantes locais, por exemplo, as casas, construções /obstáculos e *iii*) vegetação/rugosidade.



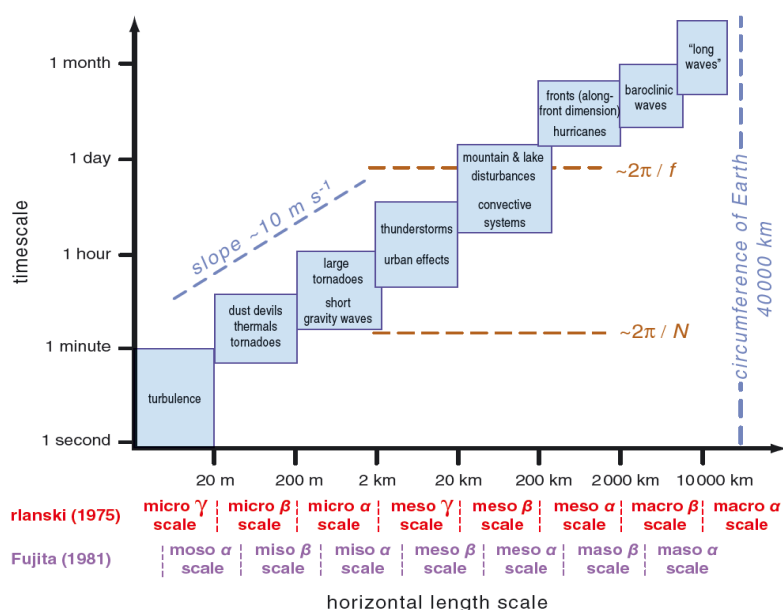


Figura 2-3: Escalas do escoamento atmosférico [24].

### 2.2.1. Brisa marítima

Estes tipos de brisas incidem sobre a zona costeira, sendo que, são formadas devido à diferença de temperatura entre as superfícies terrestre e oceânica, que podem ascender aos 10°C dentro de um espaço de dezenas de quilómetros [34]. Contudo, sobre condições favoráveis, a sua influência pode interferir e modificar o clima de uma vasta região.

Durante o dia, essencialmente nos meses de Verão, ocorre a transferência de calor por convecção originando o aquecimento do ar numa camada junto da superfície terrestre e oceânica. Todavia, existem diferenças no aquecimento destas camadas devido à elevada capacidade calorífica da água [4], [35], que impede a ocorrência de grandes variações térmicas no oceano durante o ciclo diurno associadas à radiação solar.

Contudo, esta situação resulta numa elevada diferença de temperaturas que desencadeia uma circulação atmosférica direta com certas características. Neste sentido, durante o dia, o ar mais quente junto da superfície terrestre tende a ascender na atmosfera continental. Devido à substituição deste ar em movimento ascendente surge uma deslocação do ar à superfície sobre o oceano na direção da costa [36].

Esta circulação marítima produz velocidades de escoamento atmosférico na ordem dos 5 a 7 m/s, sendo que, com condições favoráveis pode contribuir positivamente ou negativamente para o vento gradiente [37]. Contrariamente, durante o período noturno a circulação inverte o seu sentido – brisa terrestre ou continental. Neste caso, a superfície terrestre arrefece devido à sua inferior capacidade calorífica [33]. Este tipo de circulação estende-se, em geral, algumas dezenas de quilómetros da costa em qualquer das direções. A persistência desta circulação pode confinar o clima em determinadas regiões.

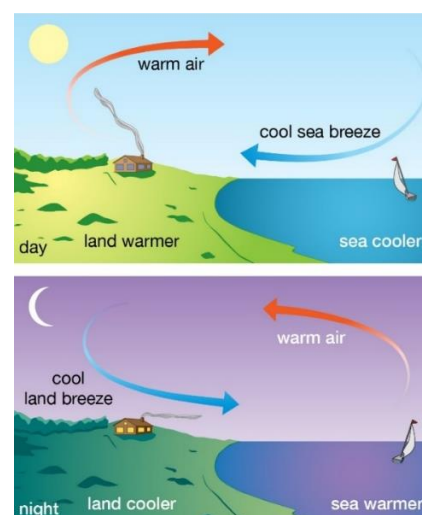


Figura 2-4: Brisa marítima e terrestre [35].

### 2.2.2. Brisa vale e montanha

O escoamento atmosférico é influenciado pela topografia, isto porque, a mesma induz um aquecimento diferencial das massas de ar devido a estas características topográficas, originando circulações atmosféricas locais [24].

Durante o período diurno existem maiores índices de radiação em zonas de maior elevação. Deste modo as massas de ar junto de montanhas tendem a aquecer mais rapidamente que nas zonas circundantes ou de vales, induzindo a circulação atmosférica entre a montanha e o vale. Assim, a montanha funciona como uma fonte de aquecimento em que o ar aquece nas zonas inclinadas do vale e sobe na atmosfera. Por outro lado, o ar mais frio e, conseqüentemente, mais denso movimenta-se para o vale. Por outro lado, o ar frio e mais denso movimenta-se para o vale. A circulação antes descrita denomina-se de brisa de vale ou vento anabático [24], [38].

Durante o período noturno a circulação ocorre no sentido contrário. Junto da montanha o ar tende a arrefecer mais rapidamente do que na região adjacente, originando a deslocação da massa de ar frio de montanha junto da superfície para o vale. Este vento pode atingir velocidades bastante elevadas e é denominado de brisa de montanha ou vento catabático [24].

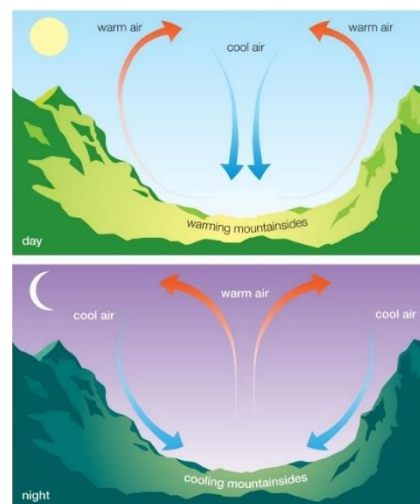


Figura 2-5: Brisa de vale e montanha [38].

### 2.2.3. Depressão térmica da Península Ibérica

Quando as circulações de brisa dominam o escoamento atmosférico em uma extensa região, pode-se originar a formação de depressões térmicas, como é o caso da Península Ibérica, onde durante o Verão, a circulação atmosférica é frequentemente deste tipo.

Devido à geografia da Península Ibérica ocorre a prevalência deste regime, isto porque, durante o dia o aquecimento da região continental induz uma circulação de brisa marítima. Dado que a altitude geográfica aumenta na direção do interior da península, esta brisa é reforçada por uma brisa de vale. Este sistema mantém-se durante várias horas, sendo que, a influência da força de Coriolis, que leva ao desvio do escoamento para a direita, transformando o escoamento quase perpendicular à costa em um escoamento aproximadamente paralelo à mesma. Esta conjugação de efeitos térmicos e geográficos, resulta numa circulação fechada no sentido ciclónico, ou seja, no sentido anti-horário para o Hemisfério Norte [34].

A depressão térmica sobre a Península Ibérica explica a origem da predominância do vento com orientação Norte – Noroeste na costa portuguesa durante o Verão, denominada por Nortada [39]. Este escoamento é caracterizado pelo aumento da sua intensidade durante o período diurno, atingindo o seu pico durante o fim de tarde. Por sua vez, durante o período noturno, o mesmo perde intensidade devido à diminuição da temperatura continental. Todavia, a temperatura não diminui o suficiente para desencadear uma brisa terrestre, isto porque, a temperatura na superfície do oceano mantém-se ligeiramente superior à continental, mesmo com a influência negativa na sua temperatura originada pelos afloramentos costeiros de águas profundas junto da costa [4], [36].



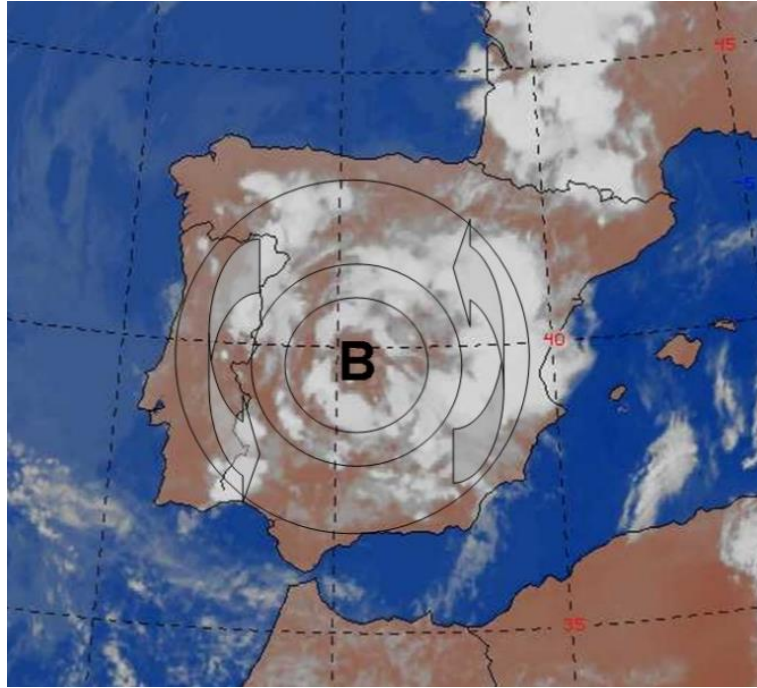


Figura 2-6: Depressão da Península Ibérica [39].

#### 2.2.4. Escoamento sobre montanhas/perturbações topográficas

Em condições de estabilidade estática, as partículas de ar oscilam verticalmente de acordo com a frequência de Brunt-Vaisale ( $N_{VB}$ ). Quando esta frequência se estabelece numa massa de ar com uma velocidade média ( $\bar{V}$ ) as partículas seguem uma trajetória ondular. Note-se que, este movimento possui um movimento de onda vertical proporcional a  $2\pi\bar{u}/N_{VB}$  [37].

Quando a trajetória do escoamento de uma partícula é obrigada a contornar um obstáculo, como uma montanha, sofre uma influência na sua trajetória. Deste modo, para uma semi-largura do obstáculo ( $D$ ), o comprimento de onda define uma grandeza adimensional designada por número de Froude interno ( $F_r$ ) [37].

$$F_r = \frac{\pi\bar{V}}{N_{VB}D} \quad (2.1)$$

Frequentemente este número é definido sem recurso ao fator  $\pi$ , ou é descrito como o rácio de inércia das forças de sustentação.

A Figura 2-7 demonstra o comportamento do escoamento atmosférico perante diferentes valores  $F_r$ , ou seja, perante diferentes obstáculos orográficos como uma montanha. Em condições de elevada estabilidade e ventos moderados ( $F_r \approx 0.1$ ), o escoamento flui em redor da montanha e não sobre a mesma. Na zona montante da montanha, parte do escoamento é bloqueado, chegando mesmo a estagnar, que em conjunto com a montanha atuam como um obstáculo de dimensões superiores sobre o qual a restante massa de ar flui em redor.

Para condições de ventos mais fortes e de menor estabilidade ( $F_r \approx 0.4$ ), parte do escoamento flui sobre topo da montanha, sendo que, em altitudes inferiores ocorre a separação do escoamento derivando parte deste em redor da mesma. O ar que flui sobre o topo da montanha possui um comprimento de onda bastante inferior à dimensão da mesma, dando origem a ondas de montanha. É de salientar que, a

separação de ondas de montanha induz a criação de uma coluna de ar no topo da montanha, da qual, a fração que flui sobre o topo da montanha é aproximadamente igual a  $F_r$ :

$$\frac{Z_{LW}}{Z_{hill}} = F_r \quad (2.2)$$

onde,  $Z_{LW}$  é igual a profundidade da coluna que flui sobre a montanha e  $Z_{hill}$  a profundidade total da coluna de ar.

Quando  $F_r \approx 1$ , a estabilidade atmosférica é reduzida e a intensidade do vento é superior. Nestas condições desenvolvem-se ondas de montanha de elevada amplitude devido a fenómenos de ressonância, que por sua vez induzem zonas de recirculação junto da superfície a jusante da montanha. Note-se que, nestas zonas de recirculação, o escoamento superficial pode estagnar ocorrendo a sua inversão.

Finalmente, para escoamentos ainda mais fortes e reduzida estabilidade, ( $F_r \approx 1.7$ ), o comprimento de onda natural do escoamento é superior à largura da montanha. Isto causa a separação da CLA a jusante da montanha e o desenvolvimento de cavidades que induzem a inversão imediata da direcção do escoamento.

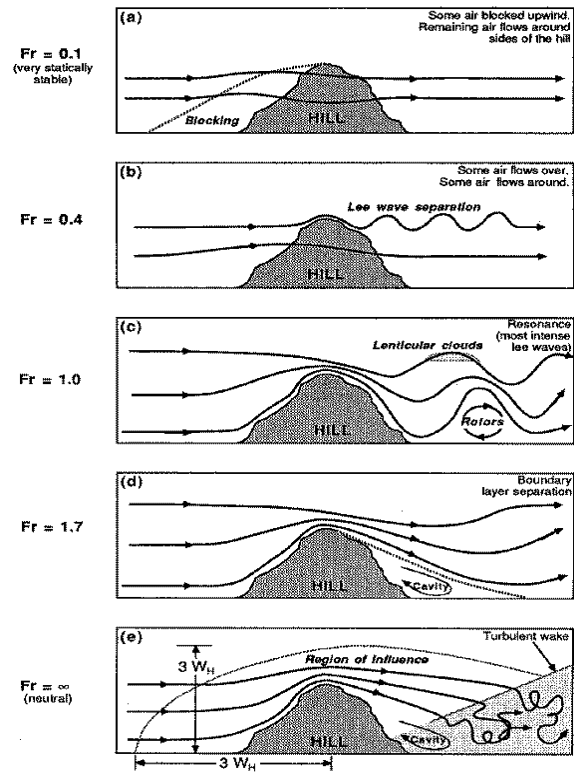


Figura 2-7: Escoamento sobre colinas para diferentes números de Froude [37].

Em condições de estabilidade neutra e ventos fortes, o número de Froude aproxima-se do infinito tornando-se inapropriado para análises dinâmicas do escoamento. Como é possível inferir através da Figura 2-7, a perturbação do escoamento a montante verifica-se a uma distância três vezes superior à largura da montanha. Junto do topo da montanha, é possível observar uma compressão das linhas de corrente, aumentando significativamente a velocidade do escoamento. Na zona a jusante da montanha, origina-se uma esteira de elevada turbulência com aproximadamente as dimensões da montanha, diminuindo a turbulência com o aumento da dimensão da mesma e da distância a jusante da mesma. Na eventualidade da inexistência de outros mecanismos de geração de turbulência a jusante da montanha a turbulência provocada pela existência decai, podendo o escoamento regressar ao estado anterior de perturbação [37].

No caso de o escoamento atmosférico possuir como obstáculo uma série de montanhas, o mesmo é modificado adquirindo um novo perfil logarítmico que possui uma rugosidade aerodinâmica característica de um terreno de elevada rugosidade. O escoamento ao fluir sobre a primeira montanha sofre um aumento de velocidade como anteriormente descrito. Seguidamente, sobre as restantes montanhas, ocorre a acumulação e sobreposição dos efeitos destas no escoamento atmosférico, produzindo um perfil de escoamento que detém velocidades reduzidas para baixas altitudes. Este tipo de perfil é característico de terrenos de elevada rugosidade [37].

Com o aumento da complexidade dos terrenos podem ocorrer variados fenómenos. Sendo que, o escoamento pode ser afunilado devido à complexidade do terreno originando escoamentos com velocidades bastante elevadas. O aquecimento diferencial de um vale pode modificar o escoamento em termos de velocidade, ou de turbulência. Em suma, nestes tipos de terrenos é necessária uma avaliação de maior detalhe do escoamento devido às suas variadas características locais. Esta análise pode ser realizada através de simulações computacionais, em CFD, garantindo-se a introdução da maioria das características do escoamento impostas pela orografia do terreno.

## 2.3. Caracterização da camada limite atmosférica

### 2.3.1. Fundamentos

A velocidade média do vento não é constante em altura, sendo que, a sua magnitude tipicamente aumenta com o aumento da distância ao solo. Este aumento é explicado através do efeito de atrito originado por obstáculos/solo que influenciam o escoamento atmosférico alterando a sua velocidade. Note-se que, a influência da força de atrito sobre o escoamento atmosférico torna-se nula para uma determinada altura finita, sendo possível definir um gradiente de velocidades em altitude. Esta zona da atmosfera, que se inicia no solo e culmina na altura em que o efeito de atrito da superfície sobre o escoamento é nulo, denomina-se de camada limite atmosférica (CLA), Figura 2-8 [32].

No interior da CLA, o escoamento atmosférico sofre influência de uma força de atrito induzida pelos obstáculos. Estes obstáculos podem ser de origem antropogénica (estruturas e edifícios) ou naturais (colinas, montanhas, arvoredo, *etc.*), sendo que, no seu conjunto são designados por rugosidade aerodinâmica do solo. Através da variação da intensidade da perturbação imposta pela rugosidade aerodinâmica do solo no escoamento é possível inferir a altura da CLA e as características dos terrenos subjacentes [33].

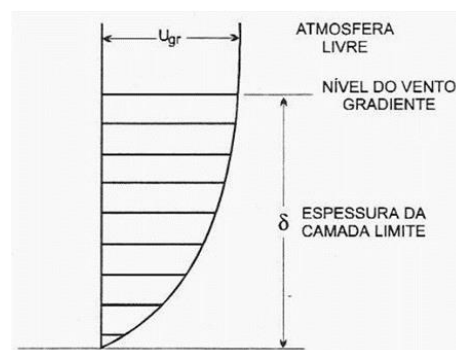


Figura 2-8: Representação da CLA [24].

Relativamente à espessura da CLA esta varia na ordem dos 600 m a 1000 m [40]. Em situações de vento forte, a espessura da CLA diminui, sendo possível desprezar o efeito de gradiente de temperatura do perfil de velocidades, que para esta situação apenas depende da rugosidade aerodinâmica [33].

As escalas de turbulência dentro da CLA dependem da estratificação térmica. Desta forma, numa camada limite homogénea é possível distinguir três condições de estabilidade atmosférica que dependem da fonte dominante de turbulência:

- **Instável:** a origem da turbulência predominantemente é por convecção, isto porque, ocorrem trocas de calor da superfície terrestre devido à incidência de radiação no solo. Desta forma, a camada limite instável (CLI) usualmente é formada após o pôr-do-sol, induzindo movimentos térmicos que intensificam o transporte vertical de quantidade de movimento aumentando a espessura da CLA [41].
- **Estável:** devido ao arrefecimento da superfície terrestre durante a noite, anula-se a turbulência vertical atmosférica. Assim, uma camada limite estável (CLE) é observada predominantemente durante o período noturno e estende-se entre os 100 e 200 metros de elevação acima da

superfície, onde o escoamento é caracterizado por elevados gradientes verticais de velocidade horizontal [41].

- Neutra: este tipo de condição é de difícil definição, contudo, a mesma ocorre geralmente durante o fim de tarde quando os efeitos de aquecimento e arrefecimento são fracos. Consequentemente, numa camada limite neutra (CLN) é possível negligenciar a distribuição de temperaturas e o fluxo de calor é aproximadamente nulo [41].

### 2.3.2. Perfil de velocidades médias

No interior da CLA usualmente recorre-se à lei de potências com o intuito de descrever a evolução da velocidade média do escoamento atmosférico [33]:

$$\bar{u}(z) = \bar{u}_{ref} \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^a \quad (2.3)$$

onde  $\bar{u}_{ref}$  corresponde à velocidade média à altura de referência, e  $a$  é o expoente da lei de potências que depende da rugosidade aerodinâmica do solo.

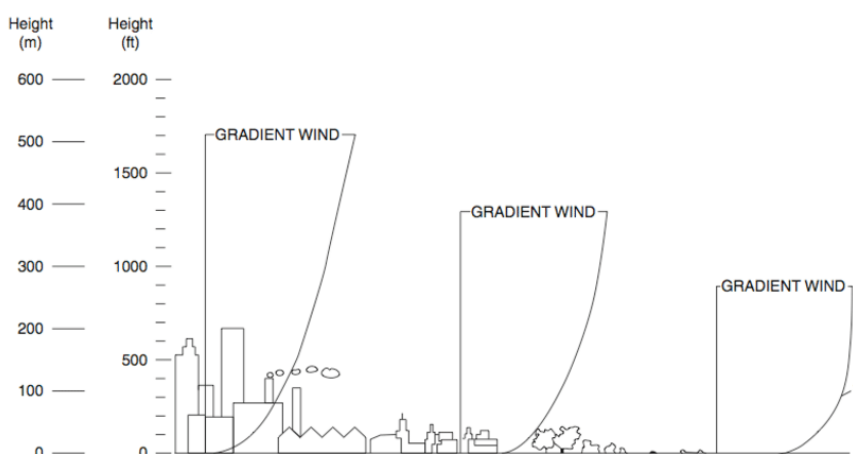


Figura 2-9: Efeito da rugosidade aerodinâmica na CLA.

A CLA pode ser dividida em duas subcamadas, isto é, a subcamada logarítmica (SCL) na qual a tensão de corte é aproximadamente constante e igual à tensão de corte no solo, e a subcamada exterior (SCE), em que a tensão de corte evolui até se anular no topo da CLA.

Na SCL é aconselhado o uso da lei de potências para descrever o perfil vertical de velocidades apenas como primeira aproximação, uma vez que, esta não consegue reproduzir corretamente as condições reais. Contrariamente, no interior da SCE, o perfil de velocidades aproxima-se de um comportamento logarítmico, sendo possível a aplicação da lei de potências. Note-se que, que o afastamento do comportamento logarítmico se deve à transferência energética do escoamento na atmosfera livre, através das subcamadas antes enunciadas, até à zona de fronteira com o solo [33], [40].

A SCL, com 40 a 150 metros de elevação acima do solo, é onde ocorre maioritariamente o aproveitamento energético do escoamento atmosférico. Para condições de atmosfera neutra o perfil de velocidades do vento nesta subcamada pode ser aproximado pela lei logarítmica de Prandtl [42]:

$$\bar{U}(z) = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (2.4)$$

onde  $u^*$  é a velocidade de atrito, que é dada por  $\sqrt{\tau_0/\rho}$ , sendo  $\tau_0$  a tensão arrastamento superficial e  $\rho$  é densidade do fluido,  $k$  a constante de Von Karman,  $z_0$  é a escala de rugosidade e  $z$  corresponde da altura acima da superfície.

Note-se que a altura máxima em que esta lei é aplicável e dada pela seguinte expressão [40]:

$$z_{lim} = b' \frac{u^*}{f} \quad (2.5)$$

onde  $b'$  é uma constante com valores que variam entre 0.015 e 0.03 e  $f$  é o parâmetro de Coriolis.

### 2.3.3. Turbulência atmosférica

#### 2.3.3.1. Fundamentos do escoamento turbulento

Considerando-se uma quantidade infinita de um fluido estacionário e uniforme, possuindo uma massa volúmica,  $\rho$ , e viscosidade,  $\mu$ . Neste fluido, sob certas condições podem ser introduzidos variados tipos de movimento. Para um movimento turbulento, a velocidade toma valores aleatórios não determináveis através de parâmetros macroscópicos. Note-se que na CLA, um escoamento em regime turbulento obtém-se para números de *Reynolds*<sup>c</sup> (Re) superiores a  $1e8$  [8], [33]. O sistema de equações diferenciais que regem um escoamento turbulento encontra-se definido com base nas equações que descrevem os princípios básicos da mecânica. Contudo, estas não são resolúveis sem a introdução de restrições de ordem empírica, ou seja, equações de fecho [8].

Devido ao carácter tipicamente turbulento do escoamento atmosférico, a velocidade do vento é dada pela soma de um termo médio estacionário e outro continuamente variável no tempo de forma aleatória, com componentes tridimensionais. Este último termo é designado por turbulência atmosférica [8].

$$U_i = \bar{U}_i + u_i \quad (i = 1,2,3) \quad (2.6)$$

onde  $i$  representa as direções dos eixos ortonormados.

#### 2.3.3.2. Equações do movimento turbulento

Os princípios fundamentais do escoamento em meios contínuos podem ser descritos recorrendo à equação de continuidade e às equações de Navier Stokes [8]. Para a escala espacial e temporal dos

---

<sup>c</sup> O número de Reynolds corresponde ao rácio de forças inerciais e viscosas. Este número é adimensional e usado para caracterizar sistemas de fluidos em que os efeitos de viscosidade são importantes no controle da velocidade e padrão do escoamento [77].

movimentos turbulentos, a força de Coriolis é desprezável. Assim, assumindo-se um fluido com densidade,  $\rho$ , uma viscosidade,  $\mu$ , newtoniano e incompressível tem-se [8]:

- Equação da continuidade ou conservação de massa:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.7)$$

- Equação da conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} - \nu \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2.8)$$

- Equação da conservação de energia:

$$\frac{\partial \left( U + \frac{1}{2} U_i U_i \right)}{\partial t} + U_j \frac{\partial \left( U + \frac{1}{2} U_i U_i \right)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial U_i P}{\partial x_i} - \nu \left[ \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\partial U_j}{\partial x_j} U_i \right) \right] \quad (2.9)$$

onde  $\nu$  é viscosidade cinemática ( $\nu = \mu/\rho$ ),  $U$  a energia interna e  $1/2 U_i U_i$  a energia cinética. Note-se que  $\partial P/\partial x_i$  corresponde ao gradiente de pressões longitudinal resultante das forças de pressão, englobando este, o efeito das forças gravíticas.

Realizando a substituição da velocidade do vento em função de um termo médio e da flutuação nas equações da continuidade, quantidade de movimento e conservação de energia obtém-se as expressões que governam o escoamento médio em regime turbulento. Considerando uma camada limite turbulenta estacionária, que se desenvolve sobre uma superfície plana e um fluido newtoniano o procedimento torna-se válido, tomando os valores médios, obtém-se para as equações de conservação de massa [8]:

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.10)$$

Com base nestas premissas, a equação da conservação da quantidade de movimento adquire a seguinte forma:

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left[ \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \rho \overline{u_i u_j} \quad (2.11)$$

onde o termo  $\rho \overline{u_i u_j}$ , usualmente denominado de tensor de *Reynolds*, encontra-se associado à dissipação de energia turbulenta e representa a contribuição das flutuações da velocidade para a difusão.

Relativamente à equação da conservação de energia, para um fluido incompressível reduz-se a um corolário da equação da quantidade de movimento que descreve o transporte de energia cinética. Note-se que a equação de transporte de energia cinética é obtida através do produto interno da equação da quantidade de movimento pelo vetor velocidade [8]:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial K}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( -\rho \bar{u}_i \bar{u}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{P} \bar{U}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \bar{U}_i \right] - \mu \left[ \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \quad (2.12)$$

onde  $K = 1/2 \rho \bar{u}_i \bar{u}_i$  corresponde à energia cinética média.

Subtraindo-se na equação da energia cinética total em termos instantâneos a equação anterior e definindo  $kt = 1/2 \rho \bar{u}_i \bar{u}_i$  como a energia cinética turbulenta obtém-se a equação de transporte para a mesma:

$$\frac{\partial kt}{\partial t} + U_j \frac{\partial kt}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{ktu_j}}{\partial x_j} = -\rho \bar{u}_i \bar{u}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{p u_i}) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \bar{u}_i \right] - \mu \left[ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (2.13)$$

Sendo que o cálculo do valor médio das equações introduz as seis componentes adicionais das tensões de *Reynolds*, as quais descrevem o efeito que a turbulência exerce sobre o escoamento médio. Este termo torna o sistema de equações de momento de conservação de momento e energia num sistema de equações indeterminado. Desta forma, é fundamental a introdução de modelos de turbulência físicos (i.e., parametrizações) que permitam a aproximação dos efeitos de turbulência do escoamento atmosférico.

## 2.4. Modelos de turbulência

### 2.4.1. Fundamentos

Existem variadas formas de modelação do escoamento turbulento, podendo ser divididas nos seguintes campos primários (ordenados conforme a exigência computacional): i) simulação numérica via equações médias de *Reynolds* (RANS); ii) *large eddy simulations* (LES); e iii) simulação numérica direta (DNS).

A DNS é a técnica mais natural para a resolução de escoamentos turbulentos, sendo que as equações de Navier-Stokes são diretamente discretizadas e numericamente solucionadas. Deste modo, a malha deve ser suficientemente refinada para a solução das menores escalas de movimento, resultando no campo completo do escoamento turbulento, tridimensional, transiente, o que é livre de qualquer tipo de modelação, possuindo apenas erros numéricos. Contudo, devido às elevadas exigências computacionais, a utilização prática da DNS limita-se a escoamentos com moderados números de *Reynolds*, sendo o número mínimo de pontos de discretização necessários para uma correta resolução espacial do escoamento proporcional à  $Re_L^{9/4}$ . Em suma, as aplicações da DNS estão limitadas a escoamentos de reduzida turbulência e geometrias simples [43].

Sendo que a turbulência é caracterizada por elevados números de número de *Reynolds*, a DNS torna-se inviável do ponto de vista prático, e as simulações RANS e LES apresentam-se como as alternativas de modelação de escoamentos turbulentos. No que diz respeito à comparação entre as técnicas LES e RANS, a primeira apresenta melhor precisão no que relativamente à simulação de separações, recirculações e vórtices do escoamento a jusante das montanhas [44]. Contudo, a sua aplicação apresenta ainda poucos estudos de sensibilidade e validação detalhada em escoamentos no interior da CLA [44], salientando-se também as elevadas necessidades computacionais e dificuldades na especificação das condições de fronteira [45]. Os modelos de turbulência variam de complexidade, sendo que, podem ser

diferenciados como modelos de *eddy-viscosity* (MEV) e modelos de *Reynolds-stress* (MRS). No primeiro tipo de modelos descritos, as suas equações são assumidas proporcionais aos gradientes espaciais, no segundo tipo, tem-se que as equações são determinadas diretamente da solução das equações diferenciais, sendo assim variáveis no tempo [45].

Maioritariamente, os modelos de turbulência recorrem a um conceito denominado por *eddy-viscosity* com a finalidade de determinar os valores as tensões de *Reynolds* [45]:

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_T \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho x KE \frac{2d_{ij}}{3} \quad (2.14)$$

onde  $\mu_T$  corresponde à *eddy-viscosity* e  $KE$  a energia cinética turbulenta. Note-se que,  $\mu_T$  não é uma propriedade do fluido, mas do estado de turbulência sendo determinado através de um modelo de turbulência.

Devido a razões dimensionais,  $\mu_T$  é proporcional a  $\mu_T = C_P V_S L_S$ , sendo que,  $C_P$  é uma constante empírica enquanto que  $V_S$  e  $L_S$  são, respetivamente, a velocidade e o comprimento de turbulência que caracterizam escoamentos turbulentos de larga escala [45].

Existem diferentes modelos de turbulência que podem ser classificados quanto ao número e tipo de equações usadas, apresentados na Tabela 2-1.

Sendo que existe variados modelos de turbulência a sua total descrição é demasiado extensiva. Deste modo, nos subcapítulos seguintes é realizada uma descrição dos modelos avaliados na presente dissertação. Note-se que, os modelos descritos se inserem na categoria de modelos de duas equações.

Tabela 2-1: Classificação dos modelos de turbulência com base no número de equações [45].

Tipo de modelo	Características
<b>Zero equações</b>	$V_S$ e $L_S$ são calculados diretamente das quantidades médias do escoamento.
<b>Uma equação</b>	$V_S$ é calculado através de uma equação de transporte adequada, usualmente energia cinética turbulenta, e $L_S$ é determinado empiricamente.
<b>Duas equações</b>	$V_S$ e $L_S$ são ambos calculados através de equações de transporte, usualmente da energia cinética e a sua taxa de dissipação.
<b>Fluxo/Tensão Reynolds</b>	Estes modelos envolvem a resolução das equações de transporte para os números de <i>stress</i> /fluxo de <i>Reynolds</i> em conjunto com a equação de transporte para $L_S$ .
<b>Fluxo/Tensão Algébrico</b>	Estes modelos diferem dos anteriores de modo a garantir expressões algébricas para as correlações turbulentas, que são usualmente solucionadas com um modelo de duas equações.

### 2.4.2. Standard k-epsilon model

O *Standard k-epsilon model* (K-ε) é modelo de duas equações com maior utilização na literatura atual. Este modelo é semi-empírico, sendo baseado nas equações de transporte da energia cinética turbulenta ( $k$ ) e na sua taxa de dissipação de energia ( $\epsilon$ ). Note-se que, a última variável determina a escala de turbulência, enquanto que a primeira avalia a energia da turbulência [46].



### 2.4.2.1. Descrição do modelo

Para deduzir este modelo é necessário assumir que o escoamento é perfeitamente turbulento e que os efeitos da viscosidade molecular são desprezáveis, sendo desta forma válido apenas para escoamentos turbulentos [47], [48]. Assim, para valores elevados do número de *Reynolds*, este modelo pode ser descrito da seguinte forma, note-se que através da primeira equação obtém-se a energia cinética turbulenta e pela segunda a sua taxa de dissipação de energia [49]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho k + \nabla(\rho u k) = \nabla \left( \rho \frac{v_l + v_t}{\sigma_{t,k}} \right) \cdot \nabla k + \rho(P_k + G_b - \varepsilon) \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \varepsilon + \nabla(\rho u \varepsilon) = \nabla \left( \rho \frac{v_l + v_t}{\sigma_{t,\varepsilon}} \right) \cdot \nabla \varepsilon + \frac{\rho \varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} P_k + C_{3\varepsilon} G_b - C_{2\varepsilon} \varepsilon) \quad (2.16)$$

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.17)$$

$$P_k = v_t \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (2.18)$$

$$G_b = -v_t g \frac{\nabla \rho}{\rho \sigma_{t,h}} \quad (2.19)$$

onde  $k$  representa a energia cinética turbulenta,  $\varepsilon$  é a taxa de dissipação,  $\rho$  é a densidade do fluido,  $V_l$  e  $V_t$  são as viscosidades laminar e turbulenta,  $P_k$  é a taxa de produção volumétrica de  $k$  por forças de corte,  $G_b$  é a taxa de produção volumétrica de  $k$  por forças gravitacionais devidas a gradientes de densidade,  $g$  é o vetor gravitacional e  $\sigma_{t,h}$  é o número de turbulência de Prandtl.

No presente modelo  $G_b$  é negativo para condições estáveis, de modo que a energia cinética turbulenta,  $k$ , é reduzida e consequentemente a turbulência atenuada. Em oposição, em condições de instabilidade,  $G_b$  é positivo o que origina o aumento de  $k$  devido ao aumento da energia gravitacional.

Relativamente às constantes empíricas, usualmente os valores usados são os seguintes [49]:

$$C_\mu = 0.09 ; \sigma_{t,k} = 1.0 ; \sigma_{t,\varepsilon} = 1.314 ; C_{1\varepsilon} = 1.44 ; C_{2\varepsilon} = 1.92$$

A constante  $C_{3\varepsilon}$  é dependente do tipo de escoamento, consequentemente, para um escoamento estável é igual a 0, e 1 para um escoamento instável. Todavia, usualmente esta constante é definida através da seguinte expressão [46]:

$$C_{3\varepsilon} = \tanh \left( \frac{v}{u} \right) \quad (2.20)$$

onde  $u$  e  $v$  são as componentes do escoamento. Pese embora a aplicação deste modelo por diversos autores, este tem demonstrado algumas lacunas na representação de alguns fenómenos atmosféricos [46], nomeadamente: *i*) separação de escoamento, *ii*) escoamentos turbulentos secundários, entre outros.

Devido a estas limitações, foram introduzidas várias correções a este modelo como é exemplo do modelo descrito na próxima subsecção.

### 2.4.3. RNG k-e model

O presente modelo é derivado do modelo *Standard k-e* através de *Renormalization Group*<sup>d</sup> (RNG) re-normalizando as equações de *Navier-Stokes*. Este modelo (RNG) é usada no intuito de desenvolver uma técnica que considera os efeitos de movimento em pequena escala, representando-os por coeficientes de transporte modificado [50].

Este modelo de turbulência induz propriedades globais do campo de escoamento resultante iguais ao escoamento induzido apenas por pressão atmosférica. Esta condição desencadeia flutuações de velocidade no escoamento em pequenas escalas, e representa os efeitos de larga escala dos vórtices em estado de inércia [50]. Relativamente às equações de *Navier-Stokes*, estas são derivadas através da sua integração sobre um grupo de movimentos de pequena escala, sendo assim removidas as influências de pequena escala. Note-se que, esta remoção é realizada iterativamente até que as alterações infinitesimais nas equações produzam alterações finitas [50].

O modelo de turbulência recorre a um conjunto de equações que apresentam constantes determinadas, e um procedimento de correções que permite o uso do modelo em situações de elevados e diminutos valores do número de *Reynolds*. Para valores elevados no número de *Reynolds* este modelo de turbulência recorre à formulação original do modelo *Standard k-e*, porém, as constantes do modelo são calculadas através do procedimento de RNG. Apesar das vantagens deste modelo face ao modelo *Standard k-e*, é importante salientar que este modelo possui dificuldades na simulação de zonas planas e zonas de jatos livres em ambientes estagnados [50].

#### 2.4.3.1. Descrição do modelo

Este modelo difere do modelo apresentado na secção anterior nos seguintes aspetos [51]:

- As constantes do modelo adquirem os valores;  
 $\sigma_{t,k} = 0.7194$  ;  $\sigma_{t,\epsilon} = 0.7194$  ;  $C_{1\epsilon} = 1.42$  ;  $C_{2\epsilon} = 1.68$  ;  $C_\mu = 0.0845$  ;  $\eta_0 = 4.38$ ;
- A equação da taxa de dissipação de transporte possui um termo adicional;

$$S_{EP} = -C_{2\epsilon}^* \cdot \rho \cdot \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2.21)$$

Note-se que as equações necessárias à definição dos parâmetros do modelo *RNG K-e* são [51]:

$$C_{2\epsilon}^* = C_{2\epsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 \left( \frac{\eta}{\eta_0} \right)}{1 + \beta \eta^3} \quad (2.22)$$

---

<sup>d</sup> A renormalização é um procedimento que ajusta os parâmetros teóricos que descrevem um sistema de modo a não alterar as propriedades mensuráveis nas escalas temporais/dimensionais de interesse. Mais especificamente, RNG é um procedimento matemático que estuda sistematicamente as alterações de um sistema físico quando visto de diferentes escalas temporais/dimensionais [78].

$$\eta = \frac{Sk}{\varepsilon} \quad (2.23)$$

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (2.24)$$

$$S_{ij} \frac{1}{2} \left( \frac{\delta U_i}{\delta x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.25)$$

O termo adicional adquire especial importância em escoamentos com elevadas taxas de deformação. Analisando o comportamento deste termo conclui-se que para escoamentos em que a força de tensão é fraca  $S$  e  $\eta$  tendem para zero, consequentemente, o termo adicional tende para zero tomando o mesmo comportamento do modelo *Standard k-e*. Contrariamente, quando  $S$  e  $\eta$  tendem para infinito o termo adicional apresenta um impacto significativo nos resultados [51].

#### 2.4.4. K-o model of Wilcox

O primeiro modelo de turbulência de duas equações foi proposto por Kolmogorov. Este modelo envolve a resolução das equações de transporte para a energia cinética,  $k$ , e para a frequência turbulenta,  $\omega$ . Note-se que, foram desenvolvidas várias versões melhoradas deste modelo como detalhadamente descrito em [52]. Uma versão melhorada foi proposta por Wilcox, *K-o model of Wilcox* (K-o), mas, atualmente, não possui uma utilização expressiva como os modelos *k-e*, sendo mais aplicado em situações de escoamentos em condições de fronteiras turbulentas e de valores baixo do número de *Reynolds*. As suas principais vantagens são [52]:

- O modelo possui um desempenho superior em escoamentos transientes e com gradientes de pressão adversa;
- O modelo apresenta uma elevada estabilidade numérica, especialmente em escoamentos com valores baixos do número de *Reynolds*;
- Análise de escoamentos para valores reduzidos do número de *Reynolds* é mais simples do que nos modelos *k-epsilon*, não necessitando de tantos cálculos ou introdução de novas variáveis e funções de suavização.

A principal desvantagem do presente modelo, relativamente aos modelos *k-e*, é a elevada sensibilidade a condições fronteiras de escoamento livre. Existem formulações do *K-o model of Wilcox* que minimizam esta sensibilidade através da inclusão termos de difusão na equação de transporte, no entanto, não se encontram disponíveis no modelo de CFD utilizado na presente dissertação.

##### 2.4.4.1. Descrição do modelo

O *K-o model of Wilcox* revisto pode ser descrito da seguinte forma [53]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \cdot k + \nabla(\rho \cdot k \cdot U) = \nabla \left( \rho \frac{v_l + v_t}{\sigma_k} \nabla k \right) + \rho(P_k - \varepsilon) \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \cdot \omega + \nabla(\rho \cdot \omega \cdot U) = \nabla \left( \rho \frac{v_l + v_t}{\sigma_\omega} \nabla \omega \right) + \sigma_d \frac{\rho}{\omega} + \nabla k + \nabla \omega + \rho \omega \left( \frac{C_{1\omega} P_k}{k} - C_{2\omega} \omega \right) \quad (2.27)$$

Onde a viscosidade cinemática turbulenta,  $v_t$ , é definida por [54]:

$$v_t = \frac{f \mu k}{\omega} \quad (2.28)$$

A taxa de produção da energia cinética a uma taxa  $k$ ,  $P_k$ , que por sua vez é determinada por [54]:

$$P_k = v_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (2.29)$$

E finalmente o parâmetro  $\varepsilon$  é definido por [54]:

$$\varepsilon = C_D \omega k \quad (2.30)$$

Note-se que  $\rho$  é a densidade ou massa volúmica,  $v_l$  e  $v_t$  são as viscosidades cinemáticas laminar e turbulenta,  $f$  são a função de suavização para valores baixos do número de *Reynolds*.

Finalmente, os coeficientes do presente modelo tomam os seguintes valores [54]:

$$\sigma_k = \frac{5}{3} ; \sigma_\omega = 2.0 ; C_D = 0.09 ; C_{1\omega} = 0.09 ; C_{2\omega} = \frac{3}{40} ; \omega_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) ;$$

## Capítulo 3 – Análise dinâmica da capacidade de transporte de linhas aéreas

### 3.1. Introdução

A análise dinâmica da capacidade de transporte usualmente designada por *Dynamic Line Rating* (DLR), é uma metodologia que avalia, em tempo real, a capacidade de condução de corrente das linhas eléctricas aéreas de transmissão/distribuição (LA). Esta abordagem determina a ampacidade de uma linha de transporte/distribuição considerando a dissipação estimada no condutor devido ao calor produzido devido ao efeito de Joule e a sua interação com o meio envolvente. Note-se que, o balanço térmico e, consequentemente, a ampacidade da linha é dependente de condições ambientais, como a temperatura ambiente, radiação solar e direção/velocidade do vento [19], [20]. Esta análise pode ser utilizada em contrapartida com a atual abordagem, onde a ampacidade máxima das linhas são estimativas recorrendo a valores conservativos dos parâmetros meteorológicos [10]. Tipicamente, os valores aplicados pelos OST's variam entre  $0.50\text{-}0.61\text{ ms}^{-1}$  no caso da velocidade do vento (direção do vento é negligenciada), irradiância entre  $1000\text{-}1150\text{ Wm}^{-2}$  e a temperatura do ar é geralmente ajustada sazonalmente de acordo com a temperatura expectável mais elevada num determinada região (caso Português) [55], [56]. Esta opção deve-se ao fato de o sistema ser planeado de modo a operar sobre as máximas condições de segurança e qualidade de fornecimento [19], [22]. No modo de operação da análise DLR, a ampacidade é considerada como uma variável dinâmica, produzindo uma estimativa conservativa do valor crítico que a linha pode operar por determinado intervalo de tempo.

A produção renovável apresenta, em termos geográficos, uma elevada dispersão assim como possui um carácter estocástico. Deste modo, a integração de PER em larga escala tem acarretado novos desafios na rede de distribuição/transporte entre zonas de produção e as principais zonas de consumo (urbanas e industriais), levando em caso a situações de congestionamento das linhas sendo necessário o reforço da rede [19]. De facto, o reforço através da instalação/*uprating* das linhas representa a abordagem comum (*business as usual*) nestas situações com custos económicos e ambientais muito significativos. Adicionalmente, a expansão da rede encontra-se associada a uma escala temporal significativa (superior a 5 anos) desde a fase de planeamento até a operação.

De acordo com [57], a análise de DLR usando condições meteorológicos locais pode aumentar a capacidade das linhas entre 10 e 30%. Um estudo que recorre ao modelo do IEEE e dados meteorológicos demonstra que a capacidade das linhas aumenta 125% durante 50% do tempo [15]. O mesmo estudo [15], aponta para a existência uma forte correlação (0.72) entre a potência eólica injetada na rede e o aumento da capacidade da linha. Vários autores apontam que a velocidade do vento é o parâmetro que possui maior impacto no balanço térmico dos condutores, seguido pela direção do vento e temperatura ambiente, enquanto que radiação solar possui um impacto inferior. Os trabalhos anteriores destacam uma elevada sinergia entre a produção eólica e a ampacidade das LA uma vez que a velocidade do vento que permite aumentar a produção do parque eólico permite igualmente arrefecer os condutores quando a necessidade é superior [9], [58].

Atualmente a literatura sobre análise económica da análise DLR é ainda limitada, isto porque, é uma tarefa multifacetada e bastante complexa. Contudo, é importante salientar o trabalho apresentado em [13], que através de um caso de estudo, Figura 3-1, analisa o impacto económico do aumento da capacidade de transmissão entre a Finlândia e o Norte da Suécia concluindo que o preço da energia eléctrica se mantém próximo dos valores históricos. Contudo, em certas horas ocorre uma redução significativa até 19.3 €/MWh, isto é, uma redução máxima de 40.8% e média de 9.4%.

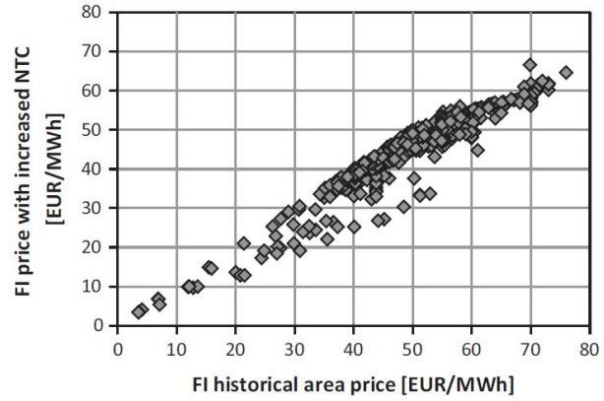


Figura 3-1: Preços da energia eléctrica com o aumento da capacidade das linhas em função dos preços históricos na Finlândia [13].

Igualmente de acordo com [13] devido à introdução da DLR, no ano de 2011, podia ter induzido uma poupança de 21.1 milhões de euros para os consumidores finlandeses. Analogamente os operadores da rede, dentro do período de análise, beneficiariam de um lucro de aproximadamente 6.8 milhões de euros. Desta forma, como reportado por [9], [11], [22], [55], a análise DLR em tempo real tem o potencial para desbloquear a capacidade de transmissão latente das linhas eléctricas aéreas sem colocar em causa as características das mesmas, adiando o reforço da rede e permitindo aumentar a penetração da PER. Isto é particularmente relevante para enfrentar os desafios da transição energética esperada na próxima década, nomeadamente, um aumento expressivo da produção descentralizada (eólica e solar fotovoltaica) uma vez que permite a maximização da utilização das infraestruturas atuais salvaguardando igualmente a segurança de operação das redes de transporte/distribuição.

### 3.2. Modelos dinâmicos

Os modelos *standard* para o cálculo da ampacidade dos condutores encontram-se definidos por dois organismos IEEE e CIGRE. Estes sofreram bastantes atualizações desde o seu desenvolvimento, sendo frequentemente utilizados para a avaliação do comportamento térmico das linhas eléctricas aéreas. Apesar de existirem algumas diferenças entre os dois modelos, a temperatura do condutor em estado estacionário é avaliada através do seguinte balanço térmico [19]:

$$R(T_c)I^2 + Q_s = Q_r + Q_c \quad (3.1)$$

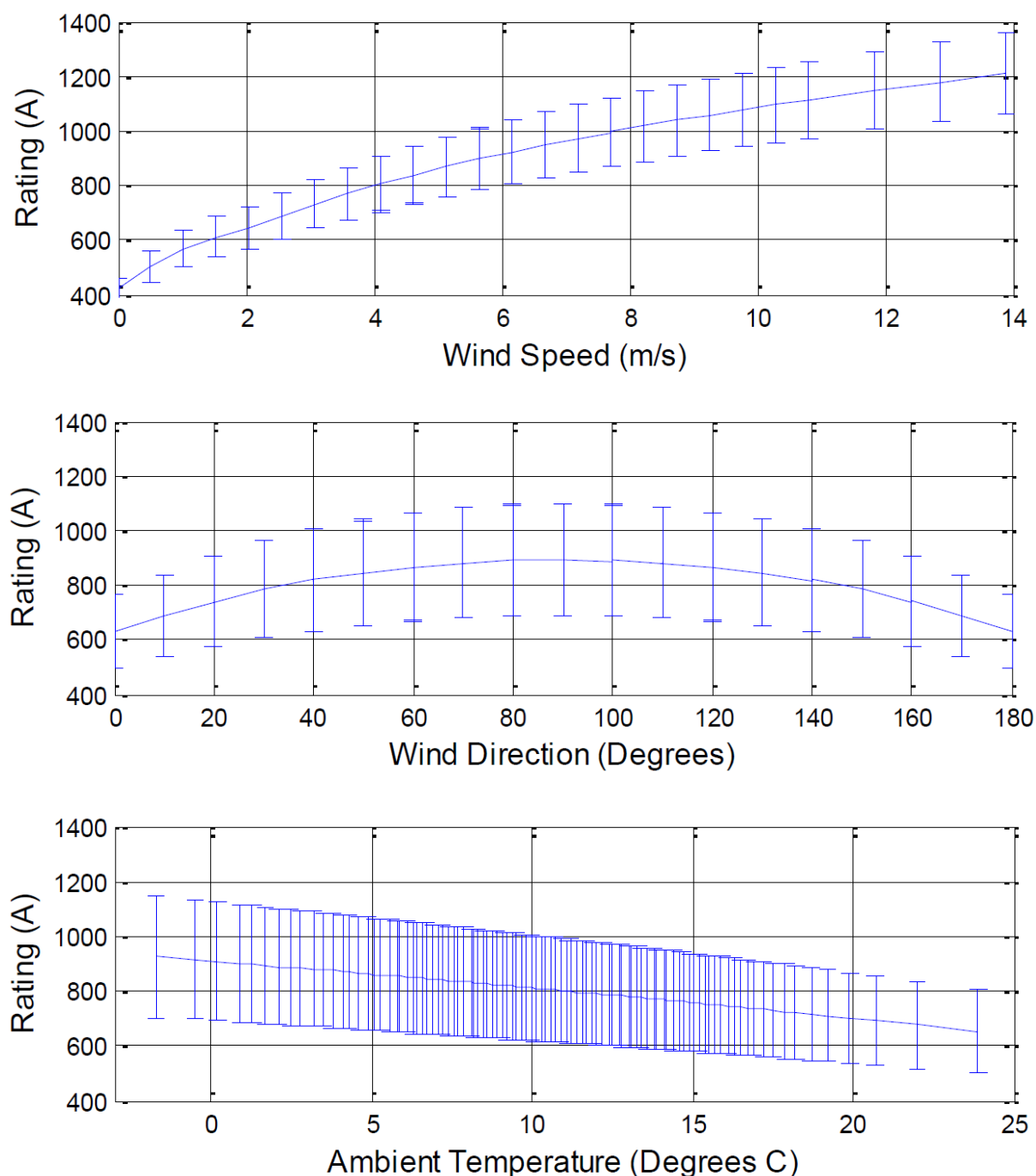
onde  $R$  corresponde à resistência eléctrica do condutor para uma temperatura específica do condutor  $T_c$ ,  $I$  à corrente eléctrica no condutor e as transferências de calor são:

- $Q_s$  por radiação solar;
- $Q_r$  por radiação dependendo temperatura do condutor e do meio ambiente;
- $Q_c$  por efeitos de convecção.

A principal diferença entre os modelos IEEE e CIGRE reside na expressão do termo convectivo ( $Q_c$ ) que é também o termo com maior magnitude no arrefecimento do condutor. Devido à semelhança entre modelos estes apresentam resultados similares exceto para velocidades do escoamento inferior a  $5 \text{ ms}^{-1}$  [19].

### 3.3. Influência dos parâmetros na análise DLR

A influência dos parâmetros meteorológicos na temperatura dos condutores é variável devido à sua natureza não linear dos mecanismos de transferência de calor. Consequentemente, o estudo da ampacidade passível de ser desbloqueada através da consideração da influência da variabilidade dos parâmetros meteorológicos para o cálculo da capacidade das linhas aéreas é da maior importância, tendo sido alvo de variados estudos. Desta forma seguidamente é apresentada uma análise da influência dos parâmetros meteorológicos mais relevantes na análise DLR, nomeadamente, a velocidade e direcção do vento, temperatura ambiente e irradiação solar, Figura 3-2. Note-se que nesta mesma figura, as curvas mostram a ampacidade média para cada valor fixo, e as barras de erro o desvio padrão devido à variação dos restantes parâmetros meteorológicos.



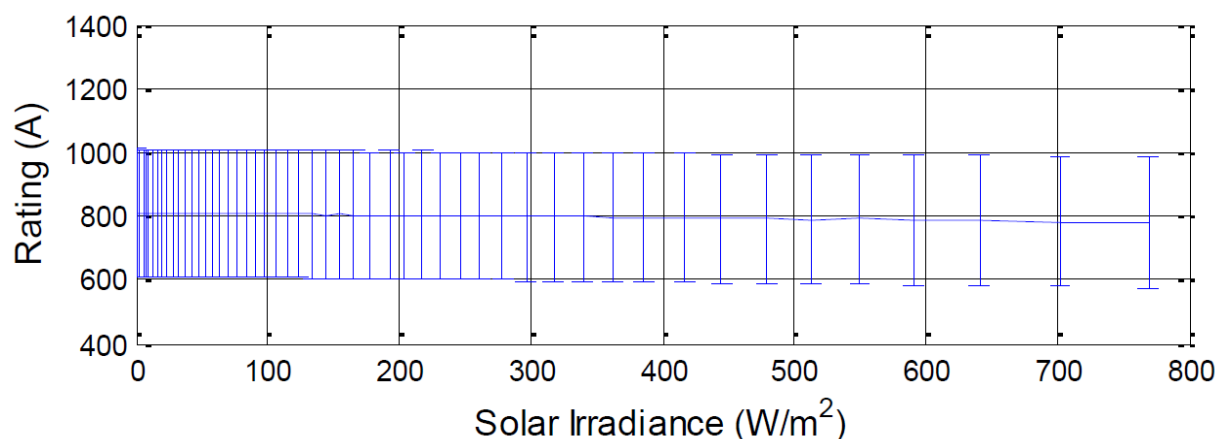


Figura 3-2: Variação na análise dinâmica de linhas aéreas como consequência da velocidade do vento, direção do vento, temperatura ambiente e irradiação solar [10].

Segundo [9], [11], [19], [20], [59] o parâmetro que detém maior influência sobre a ampacidade dos condutores é a velocidade do vento, possuindo maior preponderância no arrefecimento das linhas e, consequentemente, na diminuição da flecha. Na Figura 3-2 é possível verificar a relação entre a velocidade do vento e ampacidade obtida por [10] possui um comportamento aproximadamente logarítmico, o que demonstra uma elevada influência da velocidade do vento sobre a ampacidade das linhas aéreas. Segundo [19], [20], para velocidades do vento reduzidas, a influência dos restantes parâmetros é superior tornando-os em fatores críticos, surgindo a necessidade de monitorização e avaliação dinâmica das linhas nestas condições.

Na Figura 3-3 replica-se os resultados obtidos por [20], onde é possível perceber que durante um período em que existe vento e geração eólica (a), existe um aumento considerável da ampacidade das linhas, sendo a sua ampacidade sempre superior aos limites estáticos de Verão e Inverno. Analogamente, durante o período sem geração eólica Figura 3-3b a ampacidade das linhas mantém-se próxima dos limites estáticos devido ao reduzido arrefecimento por ação da intensidade do vento sobre as linhas aéreas. Em suma, pode-se concluir que a velocidade do vento é o elemento com mais influência na determinação da ampacidade das linhas.

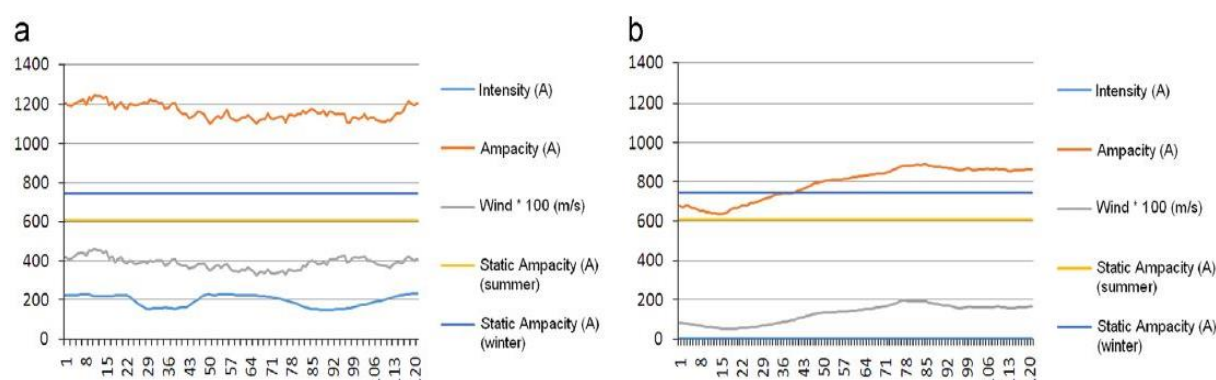


Figura 3-3: Análise de um período com vento e geração eólica, e um período sem vento e sem geração [20].

Salienta-se que a velocidade do vento possui uma variabilidade espacial e temporal bastante elevada, apresentando uma elevada variação da sua magnitude ao longo de uma LA. No interior da CLA, a velocidade do vento, apresenta uma grande variabilidade em termos verticais devido a influência de obstáculos ou a orografia do terreno. Desta forma, a dificuldade da avaliação do escoamento atmosférico



incidente nos condutores é dificultado devido às diferenças de cotas dos condutores, que pode chegar às dezenas de metros.

Com base na direção do vento e a orientação da linha é possível determinar o ângulo de incidência do vento nos condutores. Segundo a Figura 3-2, é possível analisar a influência do ângulo do vento na ampacidade do condutor, sendo possível concluir que a influência é menor do que a velocidade do vento, e é máxima para ângulos próximo de  $90^\circ$ , o que é expectável de acordo com teoria da transferência de calor por convecção [10].

O impacto da temperatura na ampacidade dos condutores pode ser avaliado através da Figura 3-2, sendo possível inferir que a mesma possui um comportamento aproximadamente linear. De acordo com [19], para a análise DLR, é considerável satisfatório um erro quadrático médio inferior a  $2^\circ\text{C}$  na estimativa deste parâmetro meteorológico. Desta forma, através do uso de estações ou avaliações meteorológicas é possível a sua introdução na análise DLR. Esta facilidade advém do facto da temperatura ambiente possuir uma baixa variabilidade temporal e espacial em zonas de orografia pouco complexa. Em regiões com orografias complexas é essencial a avaliação da temperatura ambiente de um modo mais rigoroso para não se incorrer em elevados erros na aplicação da análise DLR.

A radiação solar detém uma elevada variabilidade espacial, desta forma não pode ser considerado um único ponto para a quantificação global do efeito combinado da irradiação solar. No entanto, como é possível inferir pela Figura 3-2, a sua influência na ampacidade das linhas é reduzida, mantendo-se aproximadamente constante. Note-se que para velocidades do vento inferiores a  $0.5\text{ ms}^{-1}$  torna-se um parâmetro preponderante e limitante da ampacidade máxima admissível [19].

## Capítulo 4 – Metodologia

A estrutura da presente dissertação tem como base quatro fases distintas, sequencialmente enquadradas. Desta forma, é possível avaliar isoladamente o impacto dos diferentes parâmetros no escoamento atmosférico simulado, culminando num caso de estudo que permite avaliar a metodologia desenvolvida. A Figura 4-1 esquematiza as principais fases da presente metodologia.

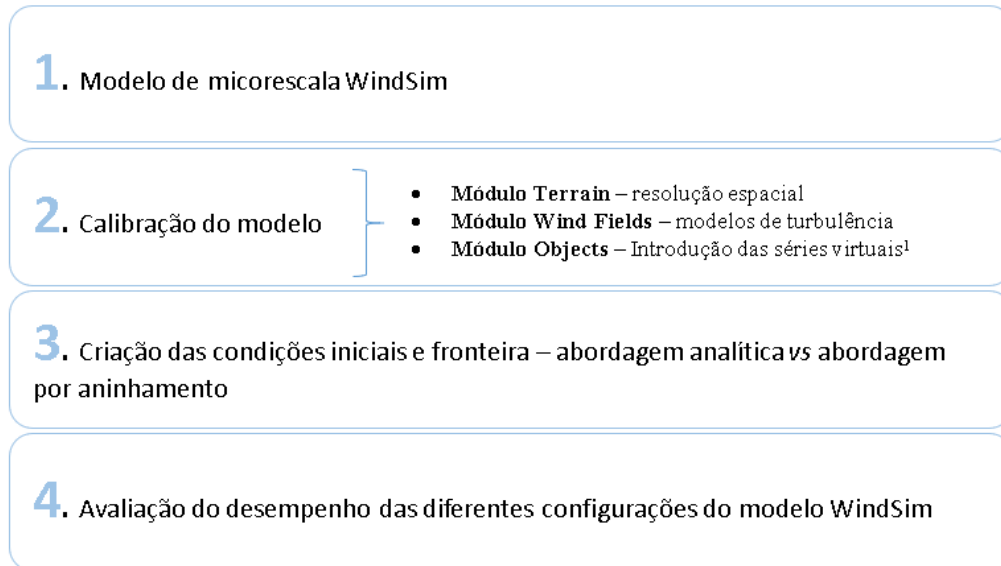


Figura 4-1: Esquema da metodologia da presente dissertação.

### 4.1. Análise do modelo de microescala

O *software WindSim* recorre à resolução das equações de *Reynolds*. Ou seja, as equações são deduzidas a partir das equações de *Navier-Stokes* usando um procedimento de médias temporais [60]. Contrariamente a uma abordagem por etapas aplicada em modelos lineares, a simulação do escoamento inicia-se através da definição das condições de fronteiras teóricas pelo utilizador. Assim, aplicando um modelo de turbulência, as equações são solucionadas através de um processo iterativo até a solução convergir para um critério de convergência pré-definido [61].

As equações de Navier-Stokes definidas na metodologia do *WindSim* são expressas na forma de tensor cartesiano:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4.1)$$

$$U_j \frac{\partial U_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( v \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - (\overline{u_i u_j}) \right) \quad (4.2)$$

<sup>e</sup> Séries de dados (e.g., velocidade e direção do vento) derivadas de um modelo de mesoescala para uma determinada localização geográfica e altura acima do nível médio do solo.

onde  $U$  é a velocidade,  $x$  a componente de posição,  $P$  a pressão atmosférica,  $\rho$  a densidade,  $\nu$  a viscosidade cinemática e os subscritos  $i$  e  $j$  são vetores unitários. Note-se que a turbulência é obtida relacionando o número de *stress* de *Reynolds* com a velocidade média através da viscosidade turbulenta:

$$\overline{u_i u_j} = \nu_T \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (4.3)$$

onde  $\nu_T$  é a viscosidade turbulenta e  $k$  é a energia cinética turbulenta.

Em termos estruturais, o *WindSim* recorre a uma estrutura modular constituída por seis módulos, como é possível observar na Figura 4-2. Os primeiros três módulos apenas correm se o módulo anterior for corretamente simulado. Os restantes três correm independentemente entre si, mas com a condição dos três módulos iniciais serem executados previamente.

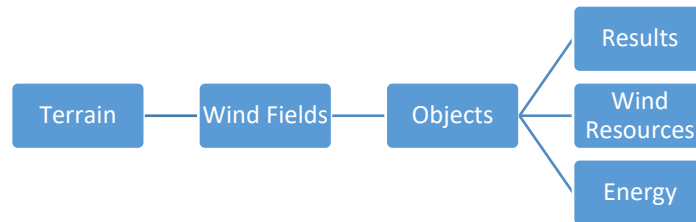


Figura 4-2: Estrutura modular do software *WindSim*.

Finalmente, salienta-se a necessidade de estudos intensivos [26], [29], [31], [61]–[66] para a compreensão dos fundamentos e capacidades do *WindSim*. Esta extensa análise do *software* demonstrou-se difícil devido à falta de informação detalhada sobre este modelo, particularmente, estudos que descrevessem calibrações de simulações usando condições iniciais e fronteira de modelos de mesoescala.

## 4.2. Calibração do modelo *WindSim*

A Figura 4-3 apresenta o processo de calibração onde é possível identificar os parâmetros analisados nos testes de sensibilidade.

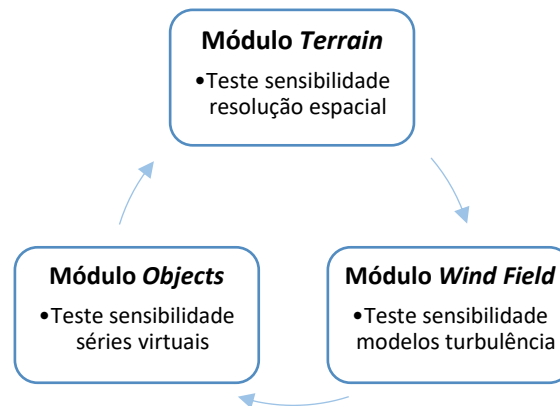


Figura 4-3: Metodologia da calibração do modelo *WindSim*.

### 4.2.1. Módulo *Terrain*

A configuração do modelo de *WindSim* inicia-se através da aquisição/conversão de dados (formato *map*) com valores da elevação e rugosidade da orografia da zona em análise, Figura 4-4. Recorrendo à ferramenta *Convert terrain model*<sup>f</sup>, é então possível a conversão do formato *map* para *gws* de uma forma eficiente e sem ser necessário o desenvolvimento de novas rotinas.



Figura 4-4: Metodologia da aquisição/conversão do ficheiro *gws*.

Após a conversão da base de dados para o formato *gws* procede-se à sua introdução no modelo de microescala (Figura 4-5). Conjuntamente, realiza-se a definição das variadas propriedades (Anexo III) do módulo *Terrain* conforme a Figura 4-6, salientando a definição:

- *Automatic gridding* – *False* para possibilitar a manipulação da dimensão da aresta das células da respetiva malha de simulação;
- *Height above terrain* – fator de 0.05 para diminuir o espaçamento da altura dos níveis de simulação junto do solo, e assim, aumentar a definição da simulação junto das alturas de avaliação do modelo;
- *Maximum number of cells* – onde permite fazer a gestão da resolução espacial do domínio de simulação;
- *Orthogonalize 3-D grid* – *True* de modo a potenciar a convergência em casos de elevados declives do terreno.

<sup>f</sup> Ferramenta disponibilizada pelo software *WindSim* que permite a conversão de ficheiros com dados da orografia de terrenos para análise em formatos terciários para o formato *gws*. Note-se que esta ferramenta e as suas funcionalidades encontram-se descritas Anexo III.

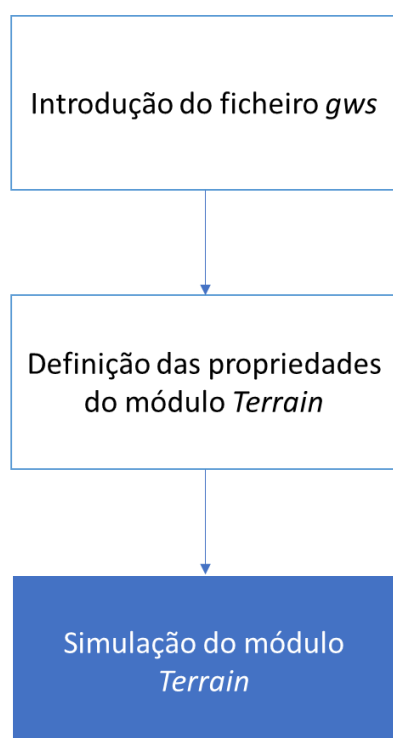


Figura 4-5: Metodologia para a simulação do módulo Terrain.

#### Properties

1: Terrain extension	
Coordinate system	Global
X-range	29000; 39000
Y-range	0; 10000
2: Roughness	
Roughness height	Read from grid.gws
3: Numerical model	
Automatic gridding	False
Refinement type	No refinement
Height above terrain	Automatic
Maximum number of cells	3500000
Height distribution factor	0.05
Orthogonalize 3-D grid	False
Number of cells in Z direction	30
4: Smoothing	
Smoothing type	No smoothing
5: Forest	
Forest	Disregard forest

Figura 4-6: Propriedades necessárias na calibração do módulo Terrain para a resolução da malha de 30 metros.

Através da simulação do módulo *Terrain* desenvolve-se o domínio tridimensional da malha de simulação. Neste sentido, mantendo todas as propriedades fixas exceto o número máximo de células (*Maximum number of cells*), é possível variar a resolução da malha análise. Este foi um dos parâmetros calibrados ao longo deste trabalho. Os valores escolhidos de resolução foram inspirados nas boas práticas aplicadas no setor eólico, onde, tipicamente o valor usado é 10 m. Foram ainda testadas as resoluções espaciais de 15 e 30 metros, como identificado em trabalhos similares [23].

### 4.2.2. Módulo Wind Fields

Outra etapa crucial da calibração do modelo de microescala, e uma das contribuições mais significativas da presente dissertação, incide sobre o módulo *Wind Fields*. Este módulo permite obter as “condições iniciais e de fronteira” do *software WindSim* que possibilitam a correção das séries virtuais para os pontos de interesse. Atualmente encontram-se disponíveis duas opções distintas para imposição destas condições: *i)* analítica através da imposição de um forçamento do escoamento para  $n$  setores direcionais – abordagem mais comum na literatura; ou *ii)* *nesting* – onde é imposto um forçamento com base num modelo *WindSim* com baixa resolução espacial ou nos dados de um modelo de mesoescala. A aplicação da técnica de *nesting* permite reduzir as imprecisões introduzidas pelas simplificações da abordagem analítica, nomeadamente, no que diz respeito a estabilidade atmosférica em diferentes pontos do domínio de simulação.

Adicionalmente, neste módulo é possível definir e testar diferentes modelos de turbulência, que, como descrito em detalhe no capítulo anterior, são fulcrais na caracterização do escoamento atmosférico. Assim, a calibração do modelo *WindSim* neste módulo incide sobre os modelos de turbulência. De referir que devido à complexidade e elevado esforço computacional, a abordagem de *nesting* foi só aplicada após identificação da calibração mais adequada do modelo *WindSim* para o caso de estudo em análise usando a abordagem analítica.

#### 4.2.2.1. Wind Fields – modelos de turbulência (abordagem analítica)

Para execução do *software* nestas condições são definidas as parametrizações de acordo com a Figura 4-7, ressaltando a definição:

- *Number of sectors* – número de setores direcionais considerados. Neste caso, optou-se por 12 uma vez que é a abordagem usual no setor eólico;
- *Height of boundary layer* – valor médio da altura da CLA (800 metros) de acordo com os dados de mesoescala;

Properties	
<b>1: Boundary and initial conditions</b>	
Do Nesting	Disregard nesting
Sector input type	Uniform distribution of the sector angles
Number of sectors	12
Sectors for next run	0;30;60;90;120;150;180;210;240;270;300;330
Height of boundary layer	800
Speed above boundary layer height	10
Use previous run as input	True
Boundary condition at top	Fixed pressure
<b>2: Physical models</b>	
Potential temperature	Disregard temperature
Air density	1,225
Turbulence model	k-omega model of Wilcox
<b>3: Calculation parameters</b>	
Solver	GCV
Number of simultaneous sectors	1
Number of iterations	500
Convergence wizard	True
Convergence criteria	0,01
<b>4: Convergence monitoring</b>	
Coordinate system	Global
Spot value X position	32000
Spot value Y position	4000
Field value to monitor	Speed scalar XYZ
<b>5: Output</b>	
Height of reduced wind database	100
Run in batch mode	False

Figura 4-7: Propriedades definidas na calibração do módulo Wind Fields recorrendo ao modelo K-o.

Todas as restantes propriedades são mantidas fixas exceto o modelo de turbulência (*Turbulence model*). Neste sentido, são avaliados três diferentes modelos de turbulência<sup>§</sup> conforme descrito na Figura 4-8 e que foram apresentados anteriormente.

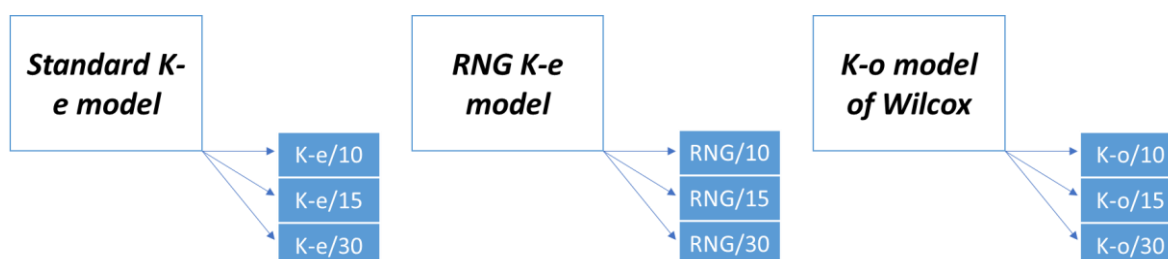


Figura 4-8: Modelos de turbulência avaliados e combinações de simulações.

<sup>§</sup> Salienta-se as dificuldades na convergência das simulações, especialmente para o modelo de turbulência K-o model of Wilcox. Consequentemente, foi necessário a alteração: i) aumento do número de iterações para 500 (nas malhas de resolução – 30 /15 metros), e 1000 na simulação da malha com resolução de 10 metros; ii) alteração de critério de convergência para 0,05 na simulação da malha com resolução de 10 metros; iii) ativação do Convergence wizard na simulação da malha com resolução de 10 metros.

#### 4.2.2.2. Wind Fields – Acoplamento mesoescala-microescala com aninhamento (nesting) das condições iniciais e de fronteira.

A abordagem apresentada nesta secção diferencia-se da abordagem comum neste tipo de trabalhos (apresentada na subsecção anterior) uma vez que permite usar os dados meteorológicos tridimensionais como condição inicial e fronteira no modelo *WindSim* - acoplamento mesoescala-microescala. Na Figura 4-9 apresenta-se de forma esquemática a abordagem aplicada.

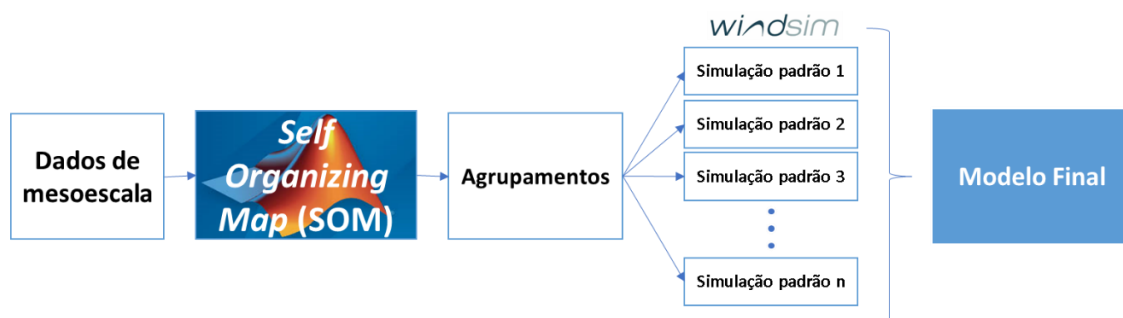


Figura 4-9: Metodologia de acoplamento usando os dados do modelo de mesoescala.

Para a aplicação da técnica de acoplamento é necessária a definição do volume de simulação/extração dos dados de mesoescala. Este domínio deve englobar na totalidade o domínio do modelo de microescala de modo possibilitar a introdução de condições de fronteira a partir dos dados de mesoescala em todas as fronteiras do domínio de microescala.

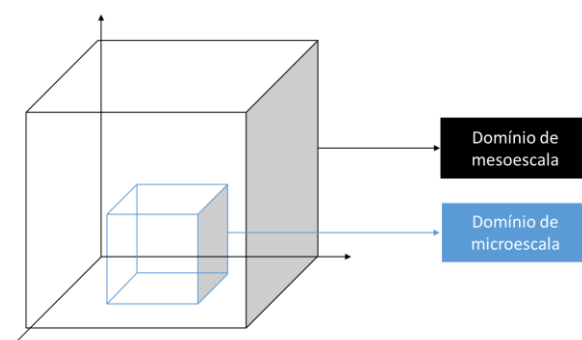


Figura 4-10: Exemplo do domínio de mesoescala que contém o domínio de microescala.

Na presente metodologia com o objetivo de identificação dos padrões do vento característicos da área simulada recorre-se a uma rede neuronal artificial<sup>h</sup> (RNA), como processo de classificação de dados por agrupamentos, nomeadamente à técnica de *Self Organizing Map*<sup>i</sup> (SOM), Figura 4-11.

<sup>h</sup> Uma rede neuronal artificial (RNA), segundo [79] fundamenta-se na determinação de relações não lineares entre os dados de entrada e saída, através de treinos. Relativamente à constituição da RNA, esta é composta por unidades de informação (neurónios) que possuem um determinado peso associado, com impacto direto na definição de um resultado plausível. Existem três camadas numa RNA: i) camada de entrada, que se caracteriza por uma camada passiva que apenas tem em conta os dados providenciados pelo utilizador, ou seja, matriz impulso; ii) camada escondida, é a camada ativa onde a rede de neurónios é consecutivamente ativada com a respetiva avaliação dos pesos associados a cada um deles, permitindo a criação da função de ativação para obter os dados de saída; iii) camada de saída, é constituída pelos resultados esperados.

<sup>i</sup> A técnica *Self Organizing Map* (SOM) tem a funcionalidade de classificação e ilustração dos dados dos agrupamentos obtidos através de uma grelha desenvolvida por uma RNA. A SOM permite não só uma visão geral de toda a organização dos agrupamentos estudados, mas também, uma análise local através de impulsos com diferentes padrões [80]. Esta técnica baseia-se na distância euclidiana entre os diversos pontos. Note-se que esta técnica necessita da definição do número máximo de agregados a estudar, e coloca as unidades de informação consoante as similaridade apresentadas dos dados de entrada.

A técnica SOM é aplicada através do recurso ao *software* Matlab possuindo como camada de entrada as componentes  $u$  e  $v$  da velocidade do vento, extraídas do modelo de mesoescala com um horizonte temporal de análise total de 5832 horas (243 dias). Assim, com base nesta técnica pretende-se classificar e agrupar cada hora do conjunto de dados num determinado grupo que apresenta características da intensidade e direção do vento similares entre si, e ao mesmo tempo, dissimilares dos restantes grupos. Após identificadas as horas (horizontes temporais) pertencentes a cada agrupamento, os valores médios dos campos tridimensionais destes horizontes temporais são obtidos e usados como condições iniciais e fronteira nas simulações em ambiente *WindSim*. Salienta-se que, o horizonte temporal dos dados de mesoescala usados como camada de entrada da técnica SOM coincide com o horizonte temporal total da campanha experimental do caso de estudo, isto porque, permite a introdução de mais características da intensidade e direção do vento do local em análise.

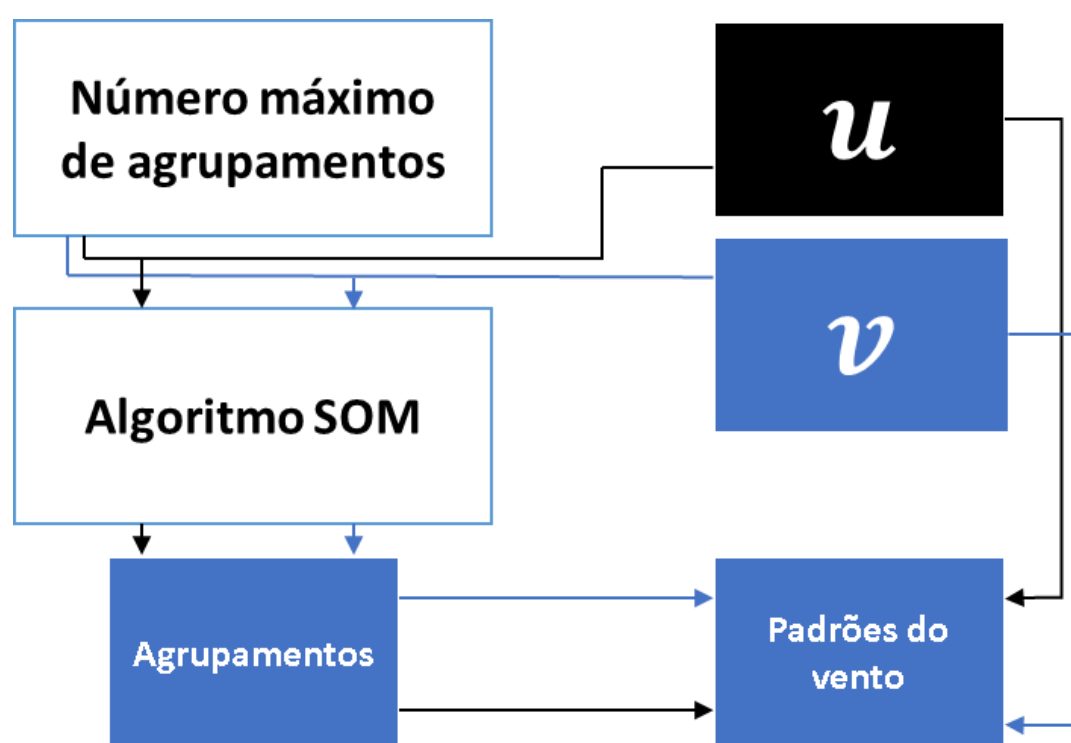


Figura 4-11: Metodologia principal da técnica SOM. Os dados das componentes  $u$  e  $v$  do vento são obtidos do modelo de mesoescala para as alturas e localizações das estações existentes.

A aplicação da técnica de acoplamento do modelo de mesoescala possibilita a simulação dos padrões atmosféricos anteriormente definidos, neste sentido, é necessário que os dados de mesoescala sejam fornecidos no formato *xyz* para diferentes localizações geográficas e níveis verticais (Figura 4-12), e, posteriormente, convertidos para o formato do *software* *WindSim* – *dws* (Figura 4-13). Note-se que esta conversão entre formatos é realizada através da ferramenta *Import mesoscale driving data* em ambiente *WindSim*.



```

38 38 33
425526 5.77319e+006 248.867 212.953 -7.27599 -0.0246948 0.00683579 98253.1 283.347
425526 5.77319e+006 248.867 212.953 -7.27599 -0.0246948 0.00683579 98253.1 283.347
425526 5.77319e+006 248.867 212.953 -7.27599 -0.0246948 0.00683579 98253.1 283.347

```

Figura 4-12: Exemplo do formato xyz. A primeira linha indica o número de pontos do domínio nas diferentes dimensões x, y e z, respetivamente. As restantes linhas correspondem aos dados ordenados de acordo com a lista em baixo.

```

WindSim version : 480 ! mandatory; .dws format version
area name : demo ! optional; area name
#nodes nxp nyp nzp : 228 226 33 ! mandatory; number of nodes in west-east and north-south direction
co-ordinate system : 1 ! optional; co-ordinate system: (1)local, (3)global
ext. xmin xmax : 0.0 35093.0 ! optional; min. and max extension in east-west direction
ext. ymin ymax : 0.0 35036.0 ! optional; min. and max extension in north-south direction
ext. zmin zmax : 0.0 0.0 ! optional; min. and max extension in vertical-direction

UCRT : ! mandatory; min. and max extension in north-south direction
1 1 ! mandatory; east-west node and vertical node
-4.739653e-001 -4.701923e-001 -4.664194e-001 -4.626464e-001 -4.590607e-001 -4.556621e-001 -4.522635e-001 -4.488649e-001
-4.415934e-001 -4.393645e-001 -4.378808e-001 -4.371303e-001 -4.363798e-001 -4.356293e-001 -4.354699e-001 -4.358922e-001
-4.370711e-001 -4.373187e-001 -4.375663e-001 -4.378139e-001 -4.371446e-001 -4.355874e-001 -4.340302e-001 -4.324731e-001
-4.268320e-001 -4.248882e-001 -4.227015e-001 -4.202831e-001 -4.178648e-001 -4.154465e-001 -4.117688e-001 -4.068911e-001

```

Figura 4-13: Exemplo do formato dws.

O desenvolvimento dos ficheiros xyz relativos a cada agrupamento é realizado através de rotinas desenvolvidas em ambiente Matlab - Anexo VI. Estas rotinas para além de isolarem as horas referentes a cada agrupamento, definindo os seus horizontes temporais, introduzem os seguintes dados na formatação da Figura 4-12:

- Longitude – sistema de coordenadas retangulares adotado;
- Latitude – sistema de coordenadas retangulares adotado;
- *Surface height* (m) – altura da superfície de entrada dos dados mesoescala (cota do terreno mais altura para a qual os dados de mesoescala são extraídos);
- *Model Layer height above de ground* (m) – cota do terreno dos dados de mesoescala;
- *u* (m/s) - componente *u* da velocidade de vento;
- *v* (m/s) - componente *v* da velocidade de vento;
- *w* (m/s) – componente (vertical) *w* da velocidade de vento;
- Pressão atmosférica (Pa) – Pressão atmosférica, que na presente metodologia por falta de dados foi considerada constante e igual é pressão atmosférica para altura média do domínio de análise;
- Temperatura (K) – Temperatura ambiente.

A Figura 4-14 esquematiza a metodologia do acoplamento. Após o desenvolvimento dos ficheiros *dws* referentes a cada agrupamento, procede-se a simulações em ambiente *WindSim*. A simulação desta opção de acoplamento inicia-se pelo módulo *Wind Fields*, em que as propriedades se mantêm iguais às do modelo de melhor performance identificado previamente, excetuando a ativação da propriedade *Do Nesting* a partir de dados de mesoescala.

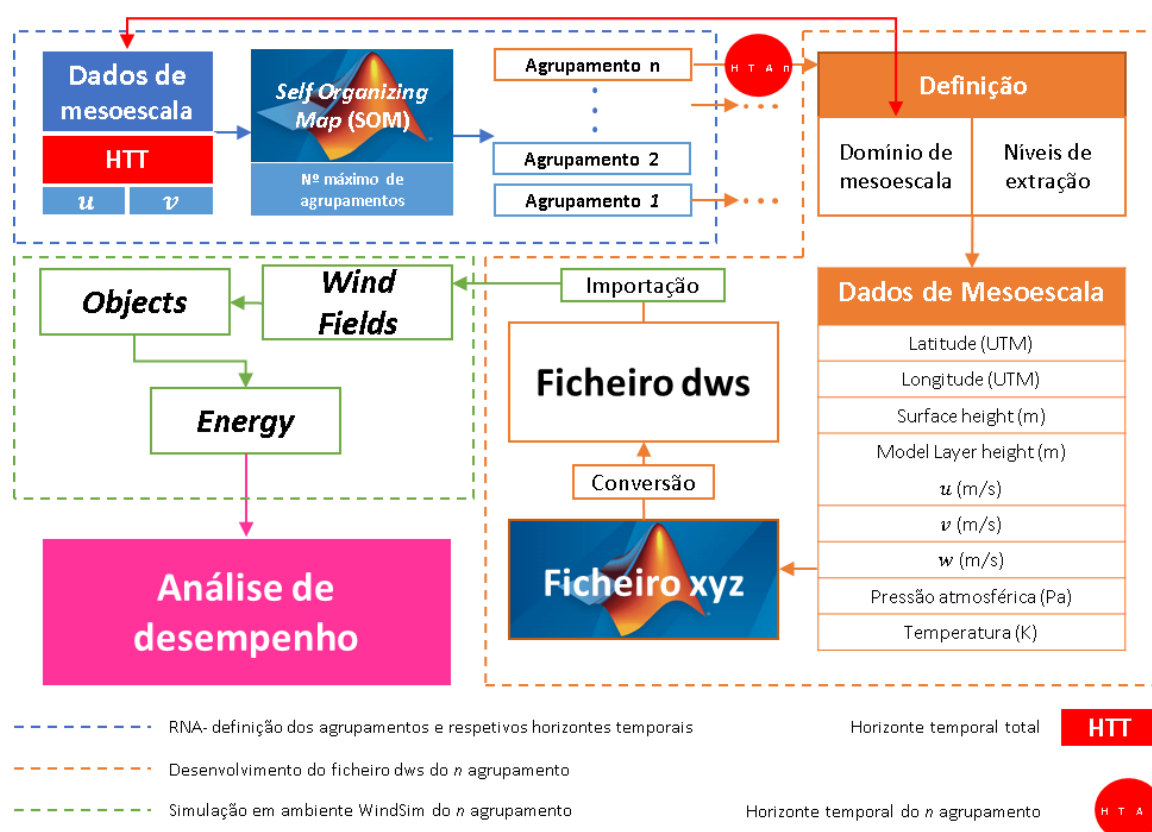


Figura 4-14: Metodologia completa da fase de calibração do método de acoplamento.

A calibração do método de acoplamento finaliza-se através da simulação do módulo *Energy*, mantendo-se as propriedades anteriormente definidas excetuando *sector interpolation* que é definida como *false* devido à incapacidade do *WindSim* realizar a introdução de dados de mesoescala através de séries virtuais quando aplicada a metodologia de *nesting* - Figura 4-19. Note-se que, o número de simulações realizadas em ambiente *WindSim* iguala-se ao número de agrupamentos identificados, ou seja, são fornecidas como condições de fronteira/iniciais os padrões do vento identificados obtendo-se o mesmo número de resultados no horizonte temporal total. Desta forma, por fim é aplicada uma rotina em Matlab que reconstrói a série temporal total de dados atribuindo os resultados de cada agrupamento obedecendo aos horizontes temporais respetivos de cada agrupamento.

Properties

1: Boundary and initial conditions	
Do Nesting	From mesoscale
Folder for mesoscale data	D:\Teses\Tese_FredericoMelo\WindSim
Cases for next run	0
Height of boundary layer	800
Speed above boundary layer height	10
Use previous run as input	False
Boundary condition at top	Fixed pressure
2: Physical models	
Potential temperature	Initialize from mesoscale
Air density	1.225
Turbulence model	Modified
3: Calculation parameters	
Solver	Segregated
Number of simultaneous sectors	1
Number of iterations	2000
Convergence wizard	True
Convergence criteria	0,05
4: Convergence monitoring	
Coordinate system	Global
Spot value X position	34000
Spot value Y position	5000
Field value to monitor	Velocity vector XYZ
5: Output	
Height of reduced wind database	50
Run in batch mode	False

Figura 4-15: Propriedades definidas na calibração do módulo *Wind Fields* para o método de acoplamento.

### 4.2.3. Módulo *Objects* – Introdução das séries virtuais

No módulo *Objects* procede-se à introdução das séries virtuais. Neste caso, o *WindSim* permite a introdução de série temporais no processamento dos resultados em vez do tradicional ficheiro de climatologia em formato de tabela de frequência, usualmente designado por ficheiro “tab”, originário do *software* WAsP. Esta é uma das vantagens deste *software* uma vez que é possível avaliar para cada registo de dados as correções impostas pelo modelo. No sentido de se avaliar a influência das diversas formas encontradas na literatura e propostas nesta dissertação de entrada das séries virtuais no escoamento simulado optou-se por realizar duas análises distintas. Numa primeira fase é avaliada a influência das opções no plano horizontal ( $xy$ ) – escolha do ponto de domínio mais adequada. Posteriormente, é analisada a influência no plano vertical ( $z$ ) – escolha da altura acima do nível do solo mais adequada.



Figura 4-16: Sequência de metodologia da avaliação da influência das séries virtuais nos resultados do caso de estudo.

#### 4.2.3.1. Opções de entrada no modelo no plano horizontal ( $xy$ )

Na primeira fase da análise avalia-se três hipóteses (Figura 4-17), para pontos de entrada no plano  $xy$  assumindo-se uma altura (plano  $z$ ) igual a uma altura típica de mastros anemométricos, Figura 4-20.

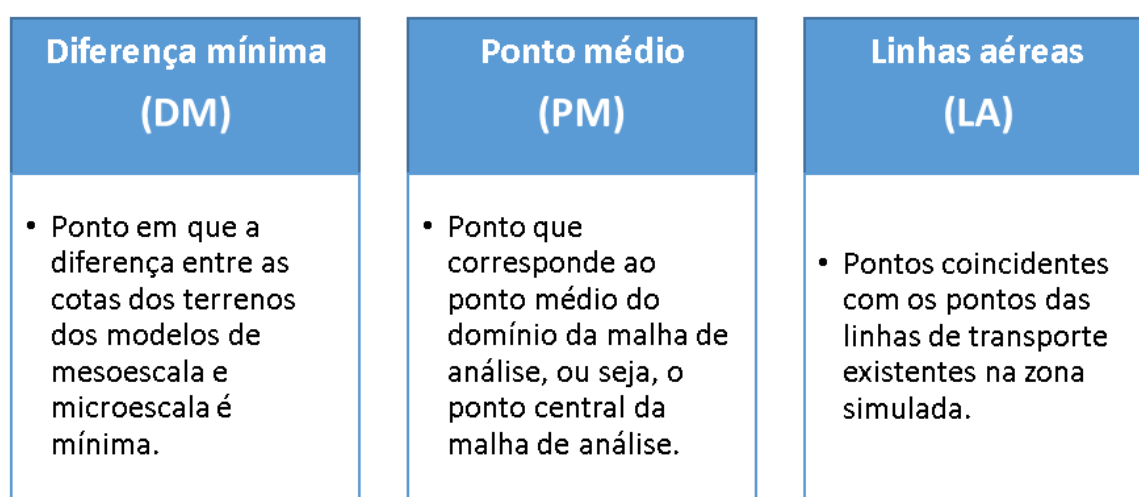


Figura 4-17: Hipóteses analisadas no plano  $xy$  para entrada das séries virtuais. Mais detalhes sobre o método DM podem ser consultados no anexo I.

De modo a se avaliar isoladamente a influência dos vários parâmetros avaliados: *i*) resolução da malha de simulação; *ii*) modelos de turbulência; *iii*) pontos de entradas das séries virtuais; procede-se a simulação no módulo *Objects* das 27 combinações possíveis, Figura 4-18.

Resolução da malha de simulação (10, 15, 30)			Esquema de turbulência (K-e, RNG, K-o)			Pontos geográficos de entrada das séries virtuais (DM, PM, LA)		
10/K-e/DM	10/K-e/PM	10/K-e/LA	10/RNG/DM	10/RNG/PM	10/RNG/LA	10/K-o/DM	10/K-o/PM	10/K-o/LA
15/K-e/DM	15/K-e/PM	15/K-e/LA	15/RNG/DM	15/RNG/PM	15/RNG/LA	15/K-o/DM	15/K-o/PM	15/K-o/LA
30/K-e/DM	30/K-e/PM	30/K-e/LA	30/RNG/DM	30/RNG/PM	30/RNG/LA	30/K-o/DM	30/K-o/PM	30/K-o/LA

Figura 4-18: Combinações das simulações dos parâmetros avaliados.

Para compreender a influência das diferentes opções procede-se à simulação do módulo *Energy* mantendo as restantes propriedades fixas (Figura 4-19) para as 27 combinações avaliadas. Note-se que, é realizada a extração dos perfis dos rotores (*Export power history*), uma vez que permite obter uma série temporal com os dados corrigidos para cada local e altura de interesse de acordo com os fatores de correção determinados no módulo *Wind Fields*.

## Properties

<b>1: Calculations</b>	
Air density correction	No correction
Method for density correction	Pitch-regulated WECS
Sector interpolation	<b>False</b>
Wake model	Disregard wake
<b>2: Export</b>	
Export power history	<b>True</b>
Export rotor profiles	False
Export turbine assessment	False
Export vertical profiles	False
<b>3: IEC Classification</b>	
IEC classification	False

Figura 4-19: Propriedades definidas na calibração do módulo *Energy*.

Recorrendo aos resultados das 27 combinações apresentadas, procede-se à avaliação dos resultados, com base na metodologia descrita no capítulo 4.3, de modo a seleccionar a opção que apresenta melhor desempenho no caso de estudo em análise.

#### 4.2.3.2. Opções de entrada no modelo no plano vertical (z)

Com base na melhor configuração identificada no ponto anterior, inicia-se a calibração do ponto de entrada das séries virtuais no plano vertical, Figura 4-16. Neste sentido são avaliadas três alturas distintas de entrada, Figura 4-20.

<b>Altura típica de mastros eólicos</b> $z = 80 \text{ m}$	<b>Altura da camada limite atmosférica</b> $z = 598 \text{ m}$	<b>Altura médias das LA</b> $z = 31.9 \text{ m}$
---	---	---

Figura 4-20: Alturas acima do nível médio do solo de entrada das séries virtuais.

Salienta-se que: *i*) altura típica dos mastros eólicos usada como referência foi adotada de [67]; *ii*) altura da camada limite atmosférica é inferida com base nos dados do modelo de mesoescala, sendo a abordagem matemática inspirada no trabalho apresentado em [68]; *iii*) altura média das linhas aéreas corresponde à altura média dos vãos dos condutores presentes na zona de análise, i.e., altura das observações consideradas para cada estação.

### 4.3. Avaliação do desempenho das diferentes configurações analisadas

Segundo [68], um modelo numérico e os seus resultados podem ser avaliados de acordo com diferentes metodologias:

- i. Comparação de resultados com soluções conhecidas de um modelo analítico similar;
- ii. Verificação dos balanços de conservação energéticos e de massa;
- iii. Comparação de resultados com outros modelos numéricos de diferente concepção;
- iv. Comparação entre resultados de formulações alternativas do mesmo modelo;
- v. Comparação os resultados do modelo com observações.

Na presente dissertação a avaliação da metodologia desenvolvida prende-se com os pontos *iii* – comparação dos resultados do modelo de mesoescala [69], com e sem acoplamento com o modelo *WindSim*, *iv* – comparação dos resultados das várias parametrizações testadas no modelo *WindSim* e *v* – comparação dos resultados obtidos com as observações disponíveis da experiência do Perdigão. Desta forma, não só é possível comparar o desempenho das variadas formulações do modelo perante as observações, como também, o seu desempenho contra outro modelo. Obter resultados semelhantes entre as diferentes formulações do modelo, não garante a sua validade no sentido da capacidade de produzir previsões acertadas. Analogamente, se a diferença entre resultados for grande, incorre-se na impossibilidade de todos os resultados estarem corretos. Logo, a avaliação do modelo perante observações é a etapa crucial da sua validação, garantindo-lhe utilidade prática e operacional [68].

No presente estudo pretende-se o desenvolvimento e aperfeiçoamento das metodologias de acoplamento para aplicações de DLR, que através da seleção da combinação ótima das suas diferentes formulações, permita a correta avaliação dos parâmetros do escoamento atmosférico junto de vãos de LA.

Finalmente salienta-se que, a velocidade de simulação e inerente capacidade de armazenamento de dados constituem igualmente um fator limitante no ponto de vista operacional do modelo. Consequentemente, as mesmas são consideradas na definição da formulação ótima do modelo.

Na avaliação qualitativa das variadas formulações testadas recorre-se, à utilização da envoltória convexa<sup>j</sup> (Figura 4-21) que permite a comparação entre resultados de formulações alternativas. Relativamente à comparação de resultados com outros modelos numéricos de diferente concepção, nomeadamente com o modelo de mesoescala MM5, introduz-se uma análise horária da velocidade do vento.

De forma a avaliar quantitativamente o desempenho do modelo de acoplamento, nas suas diferentes formulações, são considerados três tipos de erro, que refletem o afastamento entre os valores observados e simulados. O primeiro tipo é o desvio instantâneo entre os valores observados e estimados, equação (4.4). O segundo é o viés (BIAS), obtido pela equação (4.5).

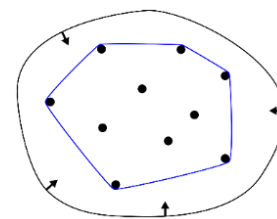


Figura 4-21: Exemplo ilustrativo da envoltória convexa

$$\text{desvio} = \theta_{s_i} - \theta_{\text{obs}_i} \quad (4.4)$$

<sup>j</sup> Em termos matemáticos a envoltória convexa de um conjunto  $S \in R^m$  corresponde á intersecção de todos os conjuntos convexos que contém  $S$ . Isto é, o menor conjunto convexo que contém  $S$  [81].

$$viés = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \Theta_{s_i} - \Theta_{obs_i} \quad (4.5)$$

onde  $\Theta_s$  representa o valor simulado,  $\Theta_{obs}$  o valor observado e  $N$  o número de observações. Assim, um valor positivo significa que o modelo sobrestima os dados observados, e um valor negativo, significa que o modelo subestima os dados observados.

O outro erro utilizado é o erro médio quadrático (RMSE), sendo este calculado através da equação (4.6).

$$RMSE = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Theta_{s_i} - \Theta_{obs_i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.6)$$

#### 4.4. Caracterização das campanhas experimentais

De forma a caracterizar o caso de estudo em análise e fundamentar algumas opções realizadas ao longo da presente dissertação, procedeu-se ao cálculo de alguns parâmetros estatísticos frequentemente aplicados no setor eólico.

- Histograma da velocidade do vento

Como mencionado anteriormente, a velocidade do vento é um parâmetro de elevada importância para a análise DLR e para a avaliação do potencial eólico de um determinado local. Desta forma, no setor eólico, para a compreensão das características do escoamento atmosférico é comum caracterizar a distribuição da percentagem de ocorrência por gamas de velocidade do vento. Em condições normais, em Portugal, a representação é assimétrica positiva, pois a predominância de velocidades baixas é mais frequente do que velocidades altas. Note-se que esta distribuição segue a tendência da distribuição de Weibull. A Figura 4-22 e Figura 4-23 demonstram dois exemplos dos histogramas obtidos para as estações com menor e maior disponibilidade de dados, respetivamente.

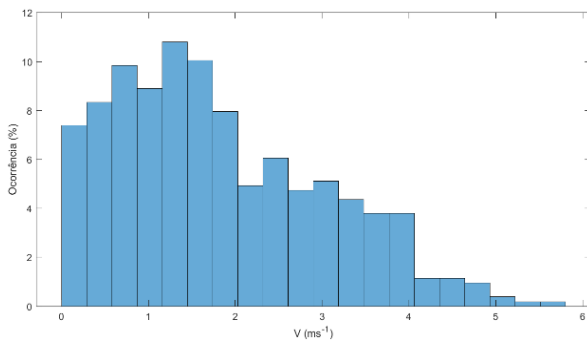


Figura 4-22: Histograma da estação (TNW 16) com menor disponibilidade de dados reais.

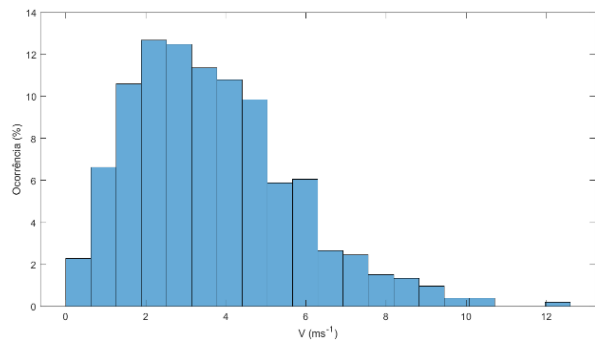


Figura 4-23: Histograma da estação (TNW 3) com maior disponibilidade de dados reais.

- Rosa-dos-ventos

De um modo complementar, para avaliar o perfil do escoamento atmosférico em termos de direção recorre-se à utilização da rosa-dos-ventos. A rosa-dos-ventos possibilita a compreensão setorial da ocorrência da direção da velocidade do vento. Porém, esta pode incluir informação sobre o recurso, que

na presente dissertação se opta por incluir a intensidade do vento. A título de exemplo têm-se a Figura 4-24 e Figura 4-25, que de modo similar aos histogramas, demonstra as rosas-dos-ventos obtidas para local com menor e maior disponibilidade de dados, sendo possível a obtenção de informação fulcral acerca do perfil de direção e intensidade do recurso em ambos os locais.

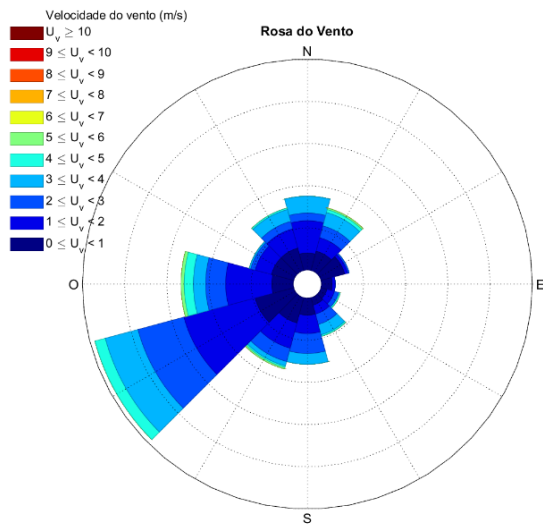


Figura 4-24: Rosa-dos-ventos da estação (TNW 16) com menor disponibilidade de dados.

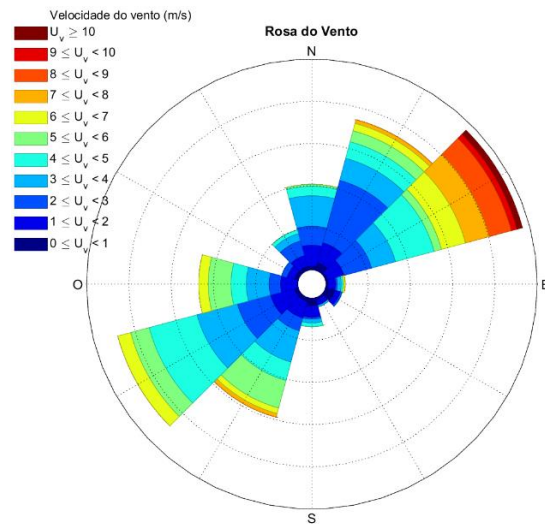


Figura 4-25: Rosa-dos-ventos da estação (TNW 3) com maior disponibilidade de dados.



## Capítulo 5 – Caso de estudo

### 5.1. Contextualização

Não foi possível obter dados da velocidade e direção do vento observados ao longo de uma linha elétrica em Portugal. Assim, o procedimento para a definição do caso de estudo prendeu-se essencialmente com a disponibilidade de um conjunto de dados experimentais numa determinada região possuindo diferentes alturas de medição acima do nível do solo. Estas características possibilitam assim uma correta validação da metodologia desenvolvida nesta dissertação, para que possa alimentar uma ferramenta de DLR, contudo, pode também providenciar informações relevantes para trabalhos relacionados com o aproveitamento do potencial eólico. Ressalvando-se a importância deste caso de estudo e inerente campanha experimental para a validação dos modelos para aplicações de DLR, pois a disposição geográfica e alturas de medição das estações anemométricas disponíveis, Figura 5-1, permitiu simular o traçado de dois vãos típicos das LAs (designados por LA do Norte e LA Sul, prospectivamente) que transpõem as colinas Oeste e Este numa configuração aproximadamente perpendicular. Desta forma, estipulou-se como caso de estudo da região do Perdigão.

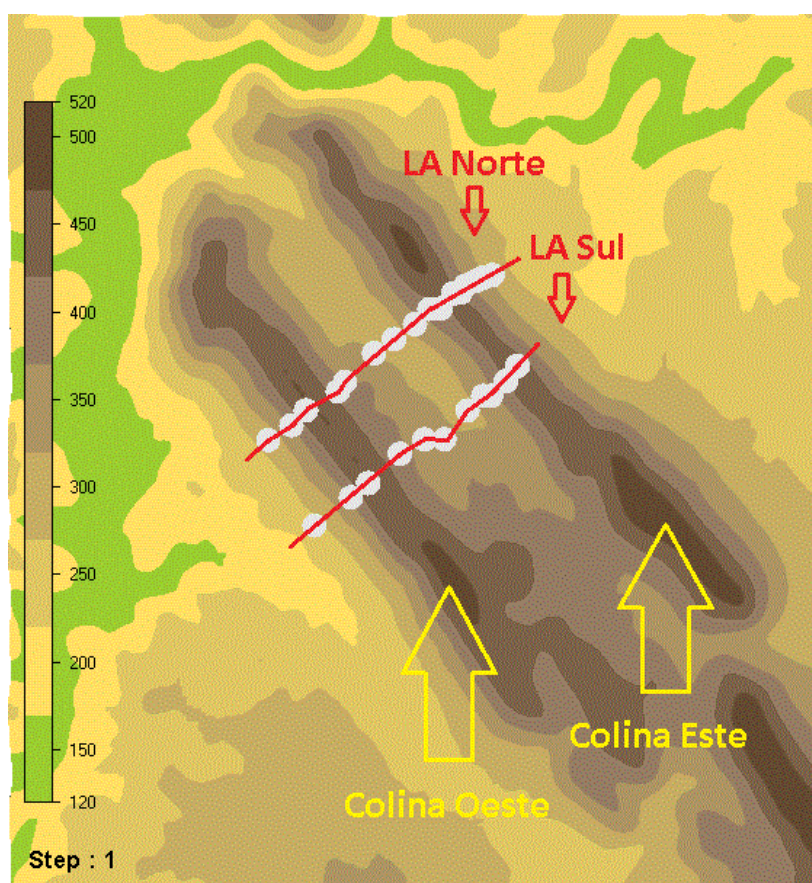


Figura 5-1: Cota do terreno (em metros) disposição geográfica das estações /meteorológicas do caso de estudo do Perdigão – círculos brancos [16]. Indicação das LAs consideradas – linha vermelha.

Esta experiência foi definida no sentido de recolher uma vasta campanha experimental com resoluções espaciais reduzidas (25 a 50 metros) [16]. O caso do Perdigão situa-se em Portugal, no município de Vila Velha de Rodão, mais precisamente na zona do Vale do Cobrão. Possuindo uma topografia, que se aproxima de um caso quase ideal de duas colinas paralelas e um vento predominantemente perpendicular às mesmas, como é possível observar na Figura 5-2.



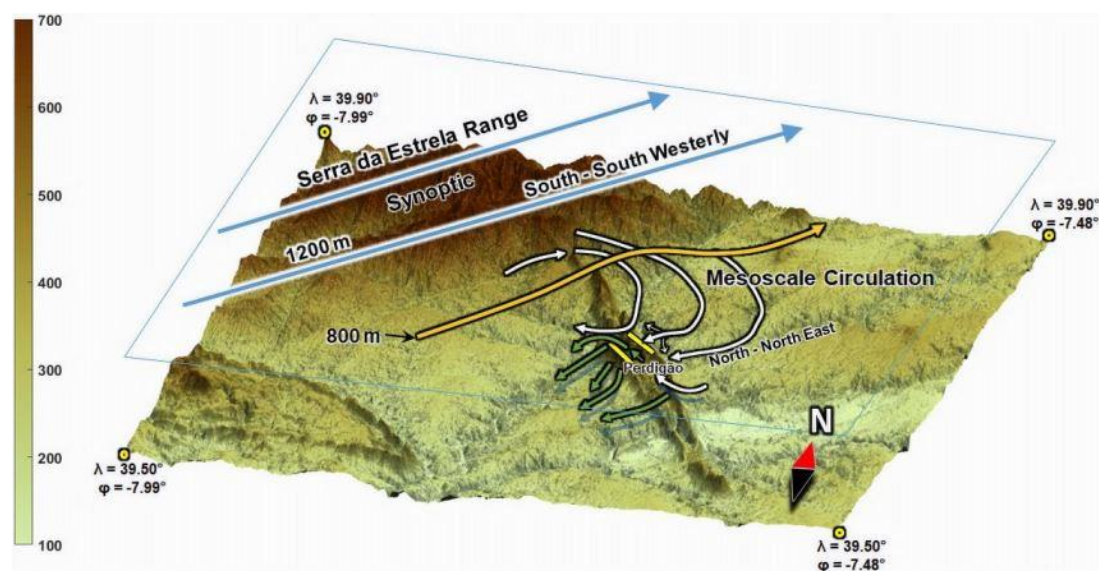


Figura 5-2: Orografia do caso do estudo do Perdigão, e esquema dos escoamentos atmosféricos típicos [16].

Relativamente aos padrões gerais do escoamento atmosférico característico deste local, foi identificado por [16], que existe a prevalência de escoamentos de mesoescala modificados pela orografia local, desencadeando efeitos locais de microescala. Ainda segundo [16], o escoamento sinóptico de O-SO transforma-se num escoamento de mesoescala com orientação N-NE na colina Este. Que quando reforçado pela brisa de montanha pode produzir fortes escoamentos noturnos no vale, superiores ao espectável em escoamentos induzidos apenas por diferenças de temperatura. Note-se que, o escoamento sinóptico e o escoamento induzido por diferenças de temperatura por vezes têm orientações opostas.

O escoamento junto da superfície no interior do vale possui uma orientação de E-SE. Sendo que possui a mesma orientação que identificada no escoamento superficial fora do vale devido à deflexão para Norte, imposta no escoamento de mesoescala pela colina Este, tornando-o estratificado e paralelo ao vale. A estratificação do escoamento no interior do vale deve-se a efeitos de arrefecimento radiativos, interferência das brisas de montanha e o escoamento de SE que entra no vale. Contudo, esta estratificação é fraca quando comparada com a exterior devido aos processos de mistura dos escoamentos no interior do vale.

Quando as condições de estabilidade no interior do vale são reduzidas (elevados números de Froude) as ondas de montanha<sup>k</sup> não são desencadeadas, induzindo o bloqueamento do escoamento a montante. Estes fenómenos são corroborados pela inversão do escoamento a montante. No escoamento no interior do vale observa-se a desconexão do mesmo no topo do vale, devido à alteração da sua direção de NE para SE.

Geralmente, o escoamento sobre as colinas possui uma orientação normal às mesmas (SO) [16]. Sendo que, na parte da tarde ocorre um aumento da velocidade a Sudoeste do vale (colina esquerda na Figura 5-3) com uma zona de recirculação no interior do vale. Na segunda colina observam-se velocidades do escoamento mais elevadas, igualmente, com uma zona de recirculação após a mesma, mas de dimensão

<sup>k</sup> São ondas que se encontram aprisionadas numa camada de alta estabilidade estática e velocidades moderadas de vento, geralmente nos quilómetros da troposfera. Estas ondas ocorrem quando a velocidade do vento acima da montanha aumenta acentuadamente com altura e quando a estabilidade diminui no topo da montanha. À medida que a energia das ondas fica aprisionada na camada estável, estas ondas podem propagam-se por elevadas distâncias a jusante da montanha.

superior. A zona de recirculação no interior do vale é afetada pelo confinamento e pela zona de recirculação após a primeira colina, não alcançando a segunda colina.

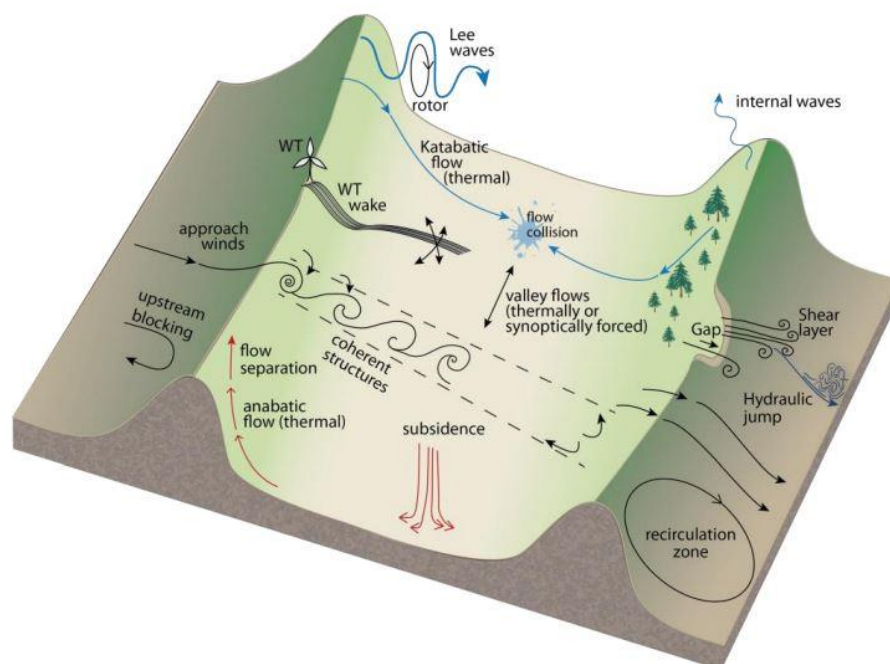


Figura 5-3: Fenómenos cateterísticos do escoamento atmosférico da região do Perdigão [16].

Com o aproximar do período noturno o escoamento torna-se radicalmente diferente. Desta forma, nota-se o desenvolvimento de uma grande massa de ar estagnada a montante da primeira colina, que se estende por mais de um quilómetro. Igualmente, observa-se no interior do vale uma massa de ar estagnada que se prolonga até à segunda colina, assim como as zonas de recirculação são inferiores às presentes durante o período diurno. Sobre a segunda colina nota-se o aumento da velocidade do escoamento, com velocidades máximas a cerca de um quilómetro a jusante da mesma.

Note-se que, os escoamentos de micro e mesoescala são sensíveis a alterações sinópticas, logo, os padrões de escoamento em cima descritos são algumas das inúmeras possibilidades de escoamentos na região.

## 5.2. Campanha experimental, base de dados e procedimentos aplicados aos dados

Relativamente à obtenção de dados referentes ao caso do Perdigão, estes foram obtidos através da campanha experimental inserida no projeto *New European Wind Atlas - NEWA*, financiado pela *European Research Area* [70]. O ficheiro da orografia e rugosidades da zona em análise foi desenvolvido pelo o LNEG no âmbito deste projeto e usado em trabalhos anteriores, [71].

A campanha experimental da experiência do Perdigão ocorreu entre as datas de 18/01/2017 a 24/06/2017, tendo sido realizada a recolha de dados com intervalos de 300 segundos (5 minutos) de vários parâmetros meteorológicos entre os quais: *i)* temperatura ambiente; *ii)* velocidade do vento e *iii)* direção do vento. A disponibilidade de dados de modo contínuo é diminuta. Surgindo a dificuldade da definição de um período, enquadrado entre os vários pontos de avaliação, em que existe uma elevada

representatividade de dados, ou seja, reduzidos períodos com falhas de dados e má qualidade dos mesmos, nomeadamente, valores anómalos.

Devido às problemáticas antes enunciadas, procedeu-se ao desenvolvimento de cronologias, recorrendo ao *software* Matlab, com o intuito de realizar uma correta análise da disponibilidade de dados. A título exemplificativo, a Figura 5-4 apresenta o pior caso em termos de disponibilidade de uma estação anemométrica, sendo possível perceber a dificuldade na definição do período de análise, devido ao reduzido período de recolha de dados. Contrariamente, a Figura 5-5 demonstra o caso com maior disponibilidade, porém, existe um reduzido sincronismo temporal das disponibilidades entre os casos expostos (Figura 5-4 e Figura 5-5), limitando os períodos passíveis de análise.

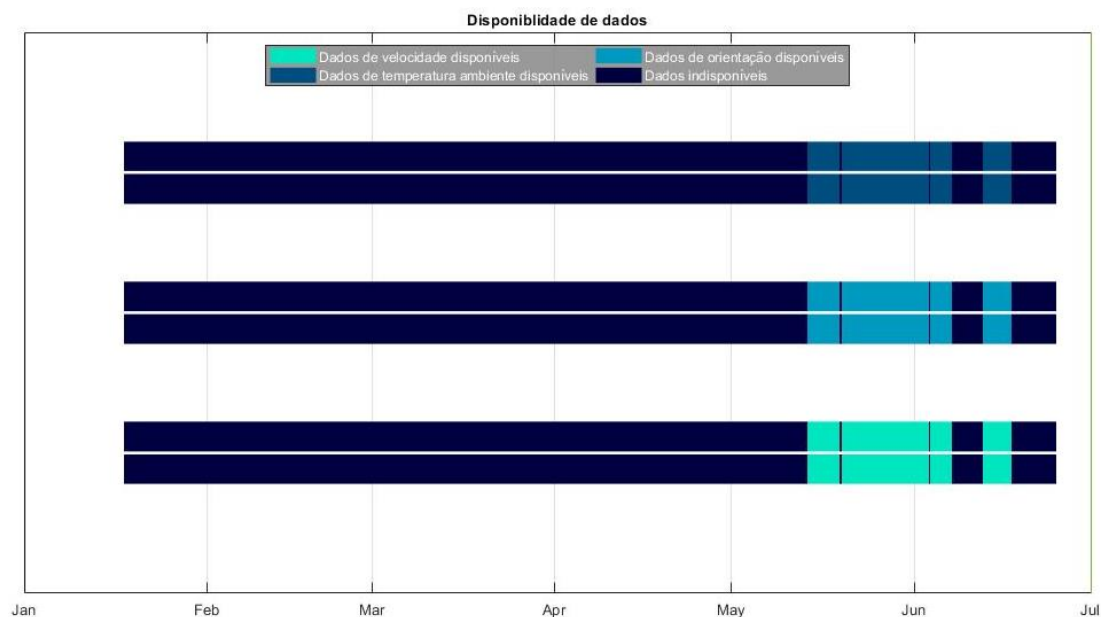


Figura 5-4: Pior caso de disponibilidade de dados estação TNW 13 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).

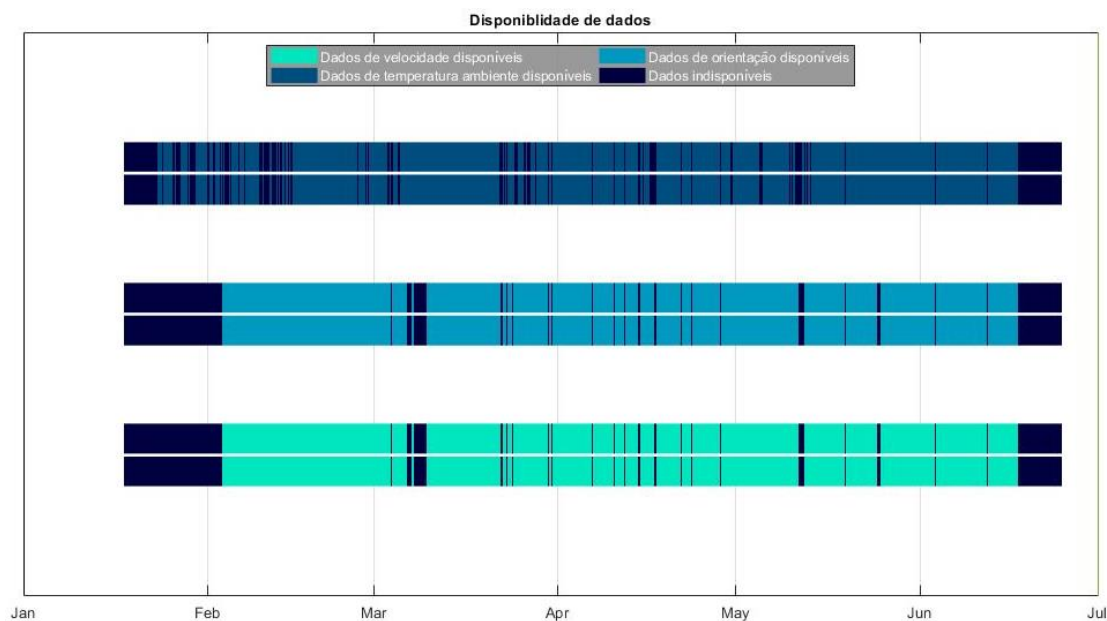


Figura 5-5: Melhor caso de disponibilidade de dados, estação TNW 3 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).

Através da análise da disponibilidade dos dados conclui-se que a maior representatividade de dados ocorreu entre o período de 16/05/2017 a 06/06/2017. Esta seleção teve como principal fator limitante a disponibilidade de dados do pior caso (Figura 5-4), pois limitou bastante a definição de um período com disponibilidade de dados de forma síncrona entre as várias estações consideradas.

Uma vez que os dados de mesoescala apresentam uma resolução temporal horária, foi necessário converter os dados da campanha experimental para a mesma resolução. Relativamente ao cálculo da média horária da direção e velocidade do vento estas seguem as metodologias presentes na Figura 5-6 e Figura 5-7, respetivamente.

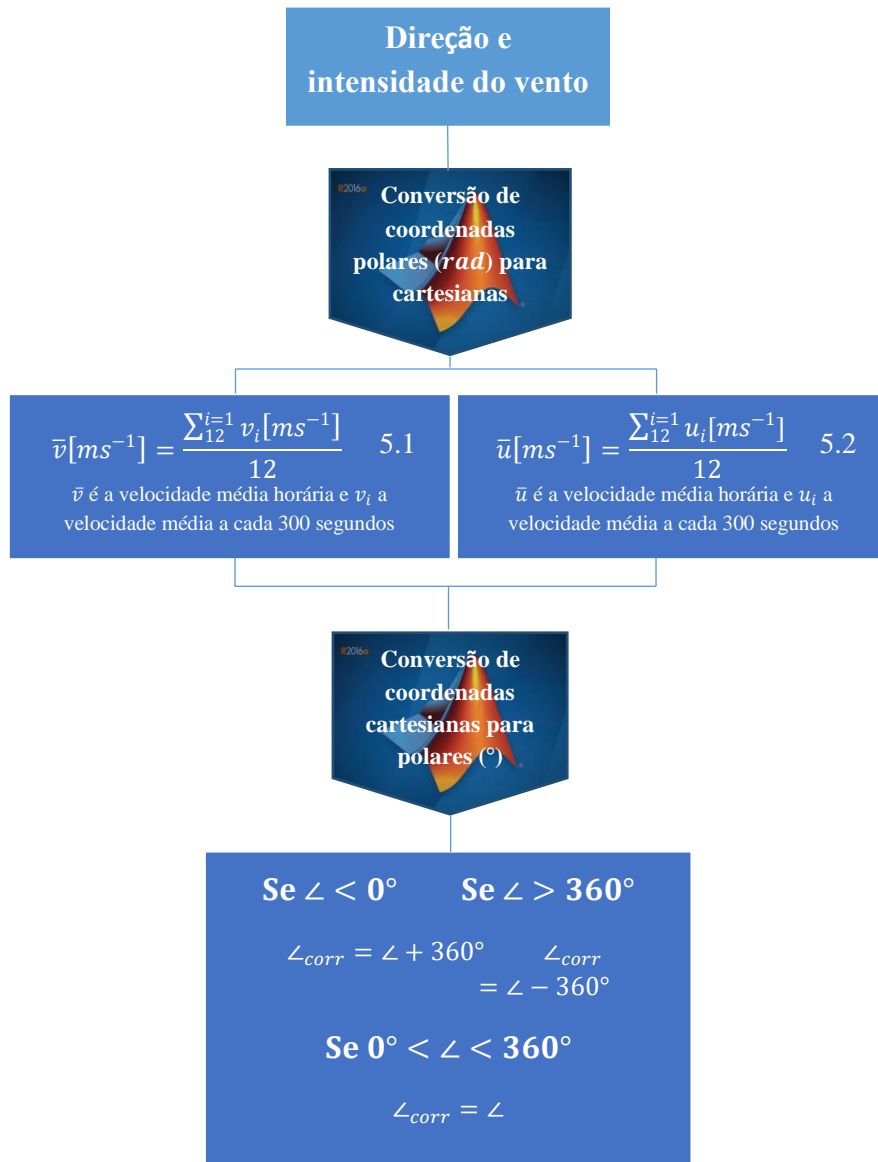


Figura 5-6: Metodologia de cálculo da média horária da direção do vento.  $\angle$  representa a direção do vento.

**Velocidade média**  
horária do vento

$$\bar{V}[ms^{-1}] = \frac{\sum_{i=1}^{12} V_i[ms^{-1}]}{12} \quad 5.3$$

*$\bar{V}$  é a velocidade média horária e  $V_i$  a velocidade média a cada 300 segundos*

Figura 5-7: Metodologia do cálculo da média horária da intensidade do vento.

Salienta-se que, como é possível observar na Figura 5-6, o cálculo da média aritmética é somente aplicado às componentes  $u$  e  $v$  do vetor velocidade do vento. Sendo que, posteriormente realiza-se a correção dos ângulos, de acordo com as boas práticas do setor eólico, pois a função *cart2pol* do Matlab tem como dados de saída os valores de ângulos medidos no sentido anti-horário a partir do eixo positivo de  $x$ , no intervalo de medição de  $-180^\circ$  a  $180^\circ$ . Note-se que, a nomenclatura aplicada no setor eólico mede o ângulo da direção do vento no sentido horário a partir do eixo positivo de  $y$ , num intervalo de medição de  $[0^\circ; 360^\circ]$ .

Relativamente ao cálculo da média horária da velocidade do vento, Figura 5-7, a metodologia baseou-se no cálculo da média aritmética, não sendo necessárias quaisquer correções. Em ambas as metodologias, o cálculo das médias horárias foi realizado iterativamente através de rotinas para as 528 horas avaliadas (22 dias). Sendo que, o fator 12 nas equações 5.1, 5.2, e 5.3 corresponde ao número de medições contidas no período de uma hora.

### 5.3. LA virtuais

#### 5.3.1. Critérios para a criação das LAs virtuais

Para a criação de LAs virtuais na região em estudo, procedeu-se a uma análise exaustiva das localizações e alturas de medição disponíveis em cada estação cruzando essa informação com as premissas presentes na Figura 5-8. Nesse sentido, foi possível projetar o *design* de LAs virtuais, Figura 5-9 e Figura 5-10. A metodologia aplicada no *design* dos vãos das LA encontra-se descrita em detalhe no Anexo II.

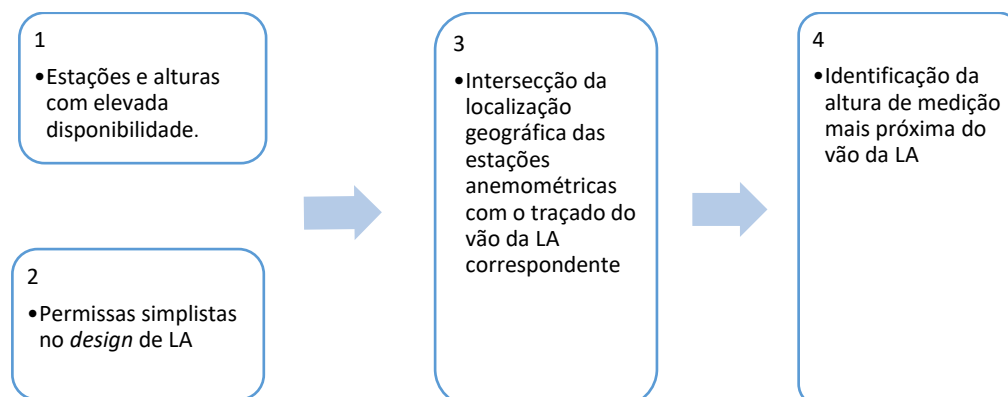


Figura 5-8: Premissas para a escolha das estações e alturas de medição para a avaliação dos pontos de validação, i.e., LA virtuais.

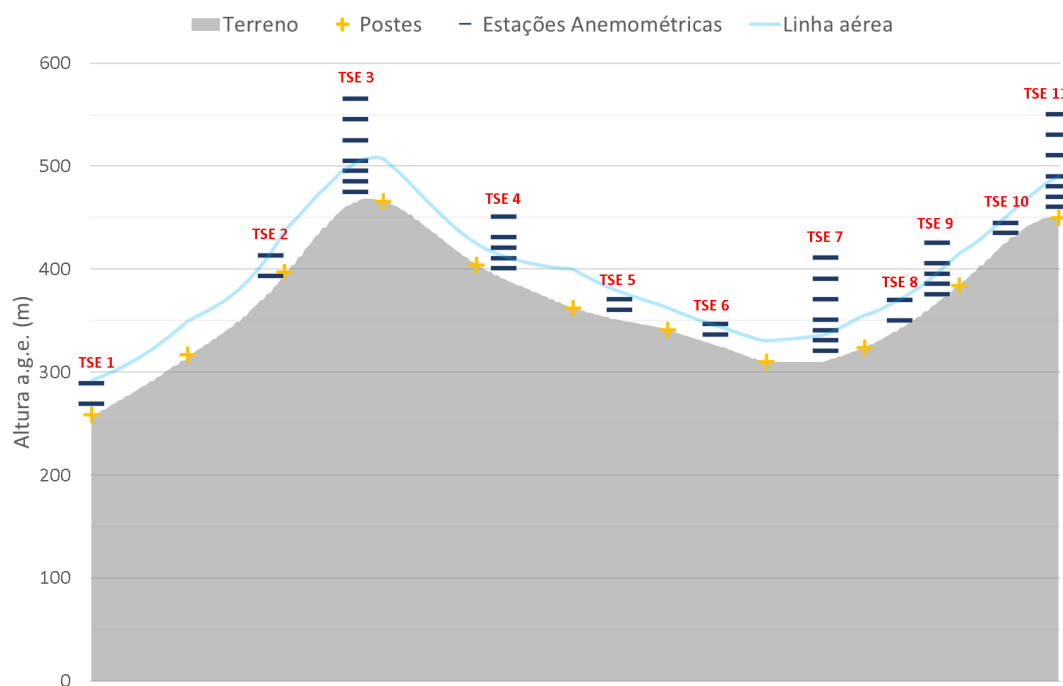


Figura 5-9: Perfil vertical da LA Sul: Localização e alturas de medição disponíveis em cada estação – traços preto, “+” localização estabelecida para os postes da LA que se encontra representada a azul.

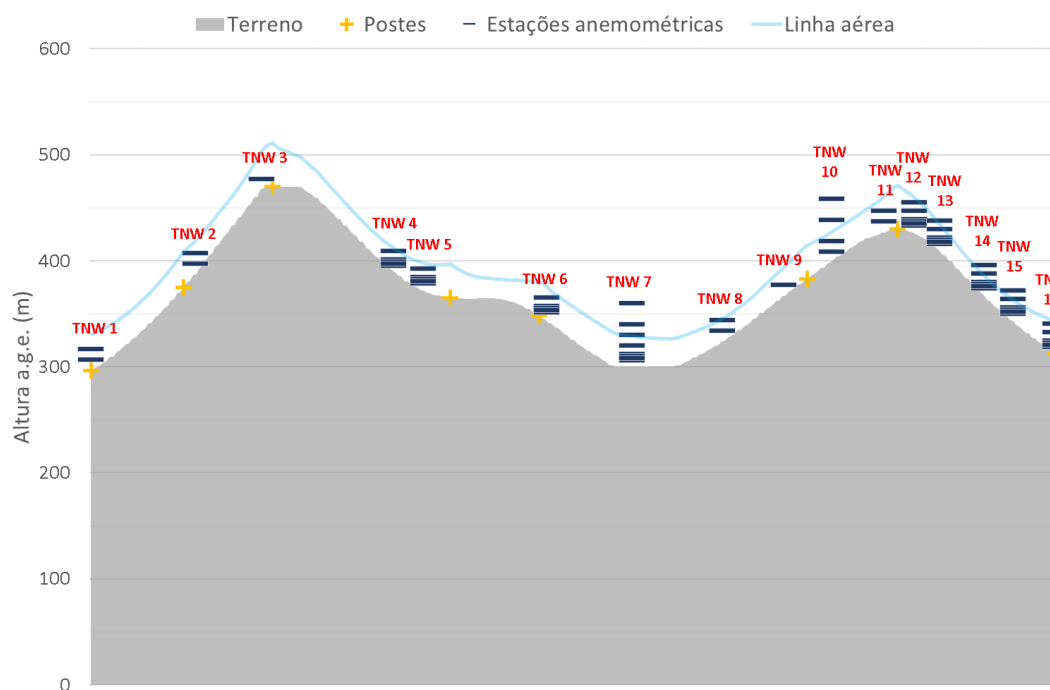


Figura 5-10: Perfil vertical da LA Norte: Localização e alturas de medição disponíveis em cada estação – traços preto, “+” localização estabelecida para os postes da LA que se encontra representada a azul.

### 5.3.2. Estações e alturas consideradas em cada LA

Na Tabela 5-1 e Tabela 5-2 apresentam-se as estações anemométricas e alturas de medição consideradas para avaliação do desempenho das diferentes configurações do modelo *WindSim* (Figura 5-11 e Figura 5-12). Nas tabelas apresenta-se igualmente o valor médio da velocidade do vento.

Tabela 5-1: Estações consideradas na LA Sul.

Estação	Longitude (ETRS89)	Latitude (ETRS89)	Altura (m)	Velocidade média do vento (m/s)
TSE 1	32968	3928	30	1.7
TSE 2	33259	4151	30	1.8
TSE 3	33395	4263	30	4.9
TSE 4	33634	4486	30	2.8
TSE 5	33823	4598	20	1.4
TSE 6	33977	4599	20	1.8
TSE 7	34156	4821	30	2.4
TSE 8	34276	4933	30	1.9
TSE 9	34336	4933	40	2.4
TSE 10	34447	5045	20	1.9
TSE 11	34532	5156	40	4.8

Tabela 5-2: Estações consideradas na LA Norte.

Estação	Longitude (ETRS89)	Latitude (ETRS89)	Altura (m)	Velocidade média do vento (m/s)
TNW 1	32613	4593	20	1.8
TNW 2	32802	4704	20	1.7
TNW 3	32921	4816	10	3.7
TNW 4	33159	4964	20	2.0
TNW 5	33212	5039	20	1.6
TNW 6	33434	5262	20	1.7
TNW 7	33588	5374	30	1.8
TNW 8	33750	5486	20	1.9
TNW 9	33861	5597	10	1.6
TNW 10	33947	5598	20	3.6
TNW 11	34041	5709	28	3.7
TNW 12	34096	5717	28	3.3
TNW 13	34141	5777	28	2.0
TNW 14	34221	5817	28	1.9
TNW 15	34273	5843	28	2.0
TNW 16	34350	5869	28	1.8

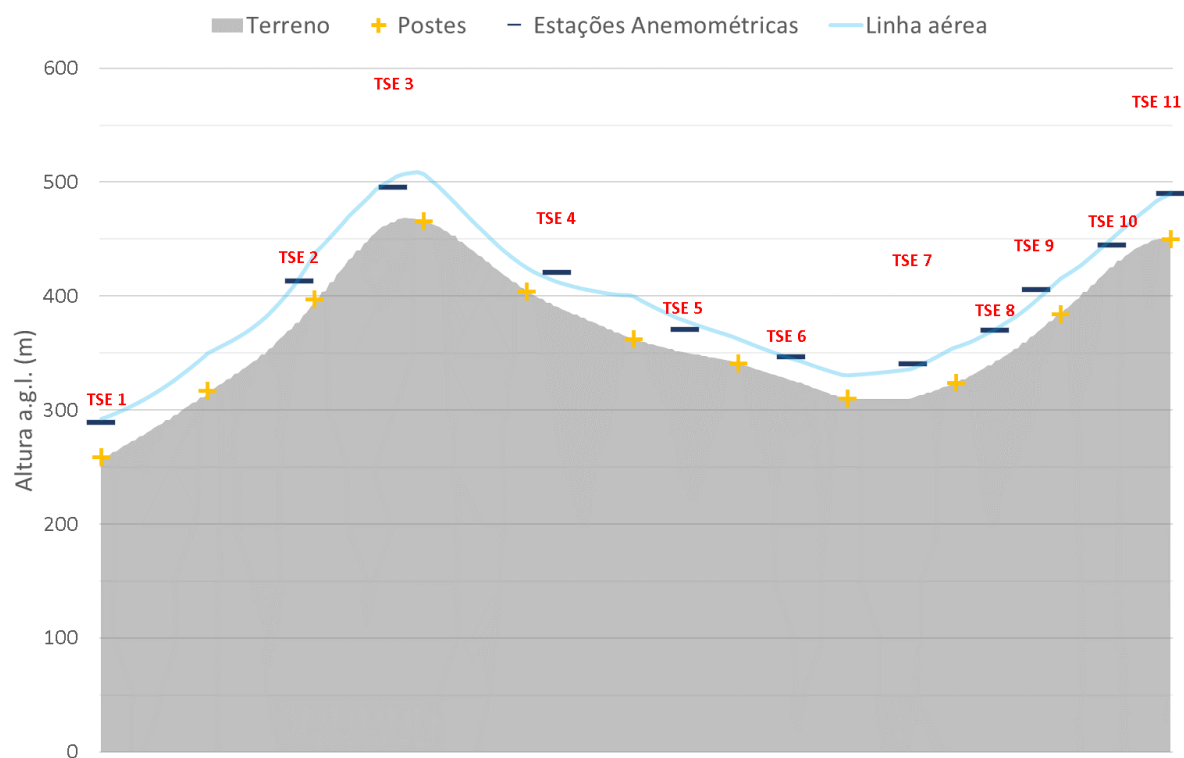


Figura 5-11: Disposição final das estações anemométricas da LA Sul.



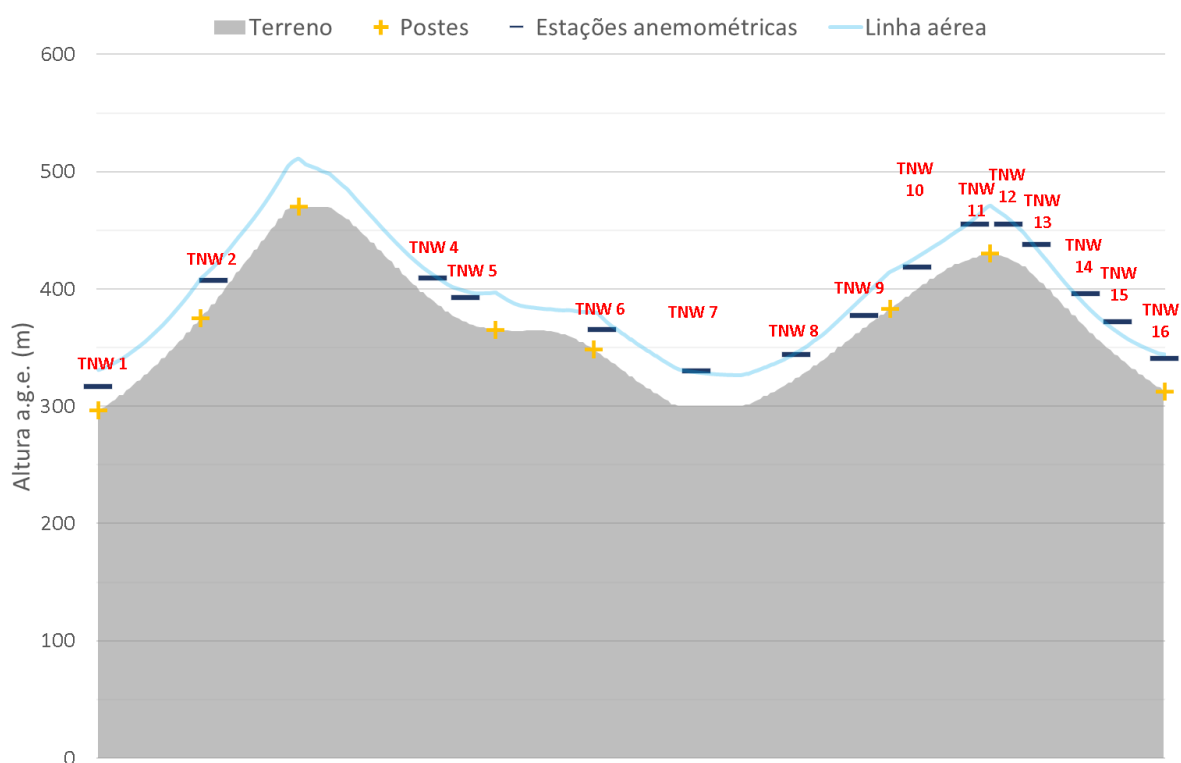


Figura 5-12: Disposição final das estações anemométricas da LA Norte.



## Capítulo 6 – Resultados

No presente capítulo é realizada uma breve análise dos dados da campanha experimental do Perdigão e a análise/avaliação dos resultados da aplicação da metodologia descrita no capítulo 4. Desta forma, através das séries temporais horárias da velocidade e direção do vento, no horizonte temporal entre 16/05/2017 e 06/06/2017 e nos 27 pontos de validação<sup>1</sup>, Figura 6-1, é possível a avaliação do desempenho das configurações apresentadas anteriormente. Devido à metodologia formulada é possível a validação dos modelos para aplicações de DLR através da extração de resultados em pontos coincidentes com as estações anemométricas, i.e., pontos dos vãos das LA.

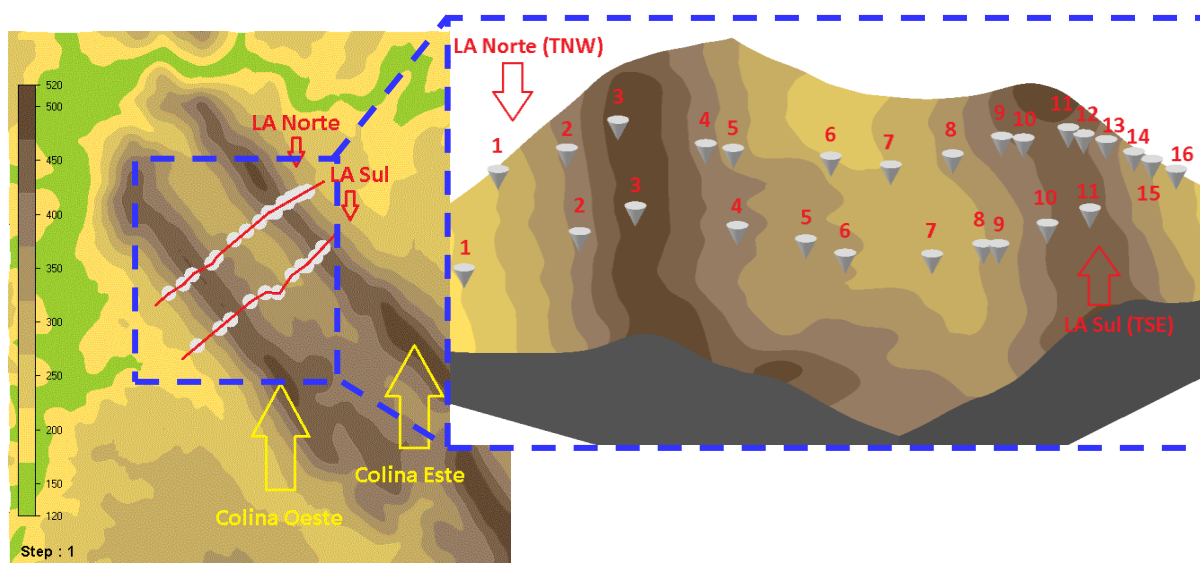


Figura 6-1: Disposição geográfica das estações na região de estudo em ambiente WindSim.

### 6.1. Análise dos dados da campanha experimental

Na Figura 6-2 apresenta-se o histograma da velocidade do vento para diferentes pontos de validação, que permite inferir que este parâmetro segue uma tendência bastante assimétrica. Em termos de incidência de registos, observa-se que 100 % da amostra se encontra em gamas de velocidade abaixo de  $15 \text{ ms}^{-1}$ . Mais especificamente, cerca de 70% da amostra nas estações TNW 3 e TNW 11 encontra-se entre as gamas entre 3 e  $8 \text{ ms}^{-1}$ , e nas estações TNW 7 e TSE 7 entre 1 e  $5 \text{ ms}^{-1}$ . O que salienta-se uma similaridade entre as estações TNW 3/TSE 11 e TSE 7/TNW 7, que se encontra dentro do expectável devido às estações i) TNW 3 e TSE 11 situarem-se nos topos das colinas (cotas elevadas), e ii) TNW 7 e TSE 7 que se situam no vale (cotas reduzidas) da região de estudo.

No mesmo sentido do parágrafo anterior, apresentam-se a Figura 6-3 e Figura 6-4 onde é possível inferir a elevada variabilidade da velocidade do vento, e que de um modo global a intensidade aumenta com a cota do terreno, com valor máximo de  $14.1 \text{ ms}^{-1}$  na estação TSE 11. Relativamente à comparação entre colinas (Oeste e Este), de um modo global a intensidade é superior sobre a colina Este (TSE 11) relativamente à colina Oeste (TNW 3), o que é expectável conforme descrito no subcapítulo 5.1. Note-se que a escolha das estações exemplificativas teve por base a cota geográfica máxima e mínima de cada vão das LAs (Sul e Norte).

<sup>1</sup> Por simplicidade na análise dos resultados optou-se por designar cada estação e altura de medição por “pontos de validação”.

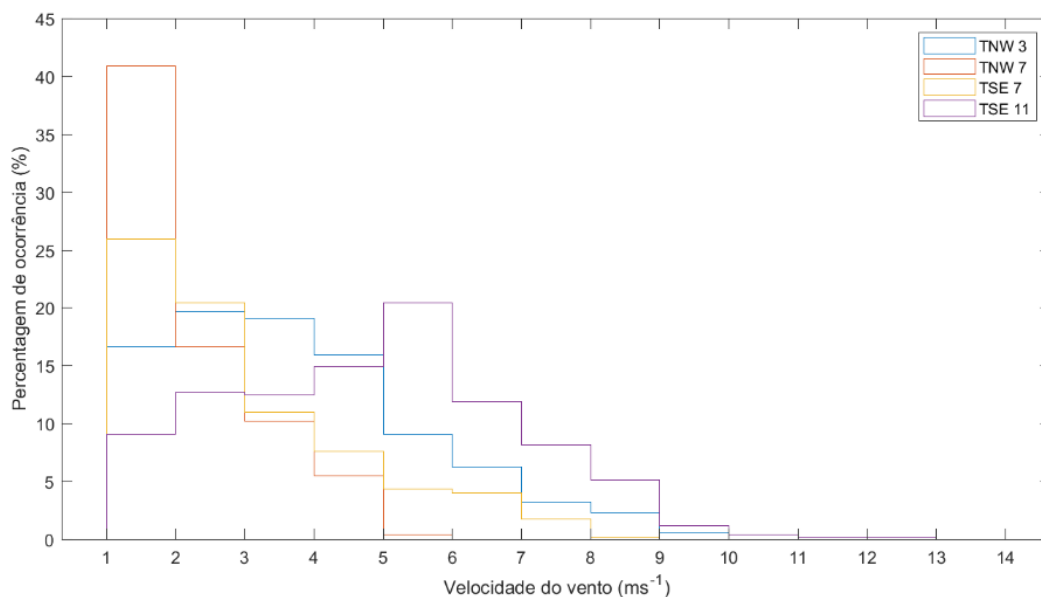


Figura 6-2: Histograma da velocidade do vento para as estações TNW 3, TNW 7, TSE 7 e TSE 11 no horizonte temporal 16/05/2017 a 06/06/2017.

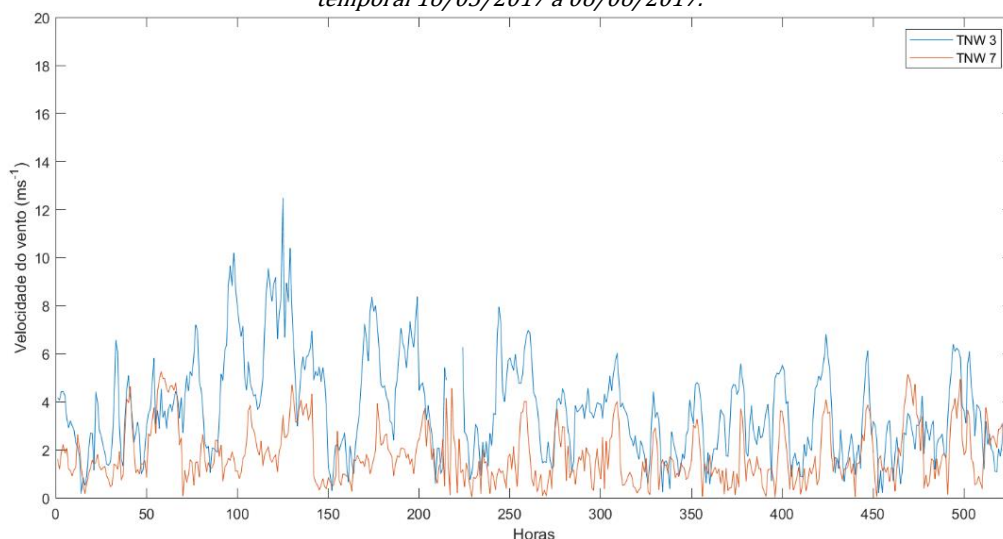


Figura 6-3: Séries temporais da velocidade do vento das estações anemométricas TNW 3 e TNW 7 no horizonte temporal 16/05/2017 a 06/06/2017.

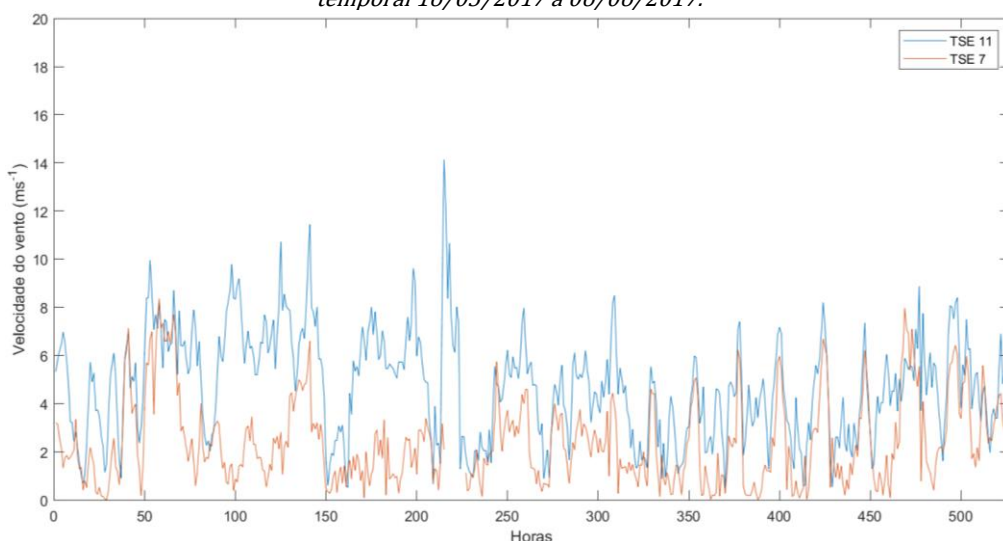


Figura 6-4: Séries temporais da velocidade do vento das estações anemométricas TSE 7 e TSE 11 no horizonte temporal 16/05/2017 a 06/06/2017.

Para o estudo e compreensão do perfil do escoamento atmosférico em termos de orientação apresentam-se a Figura 6-5 - Figura 6-8, que demonstram a distribuição da velocidade e frequência do vento para cada setor direcional.

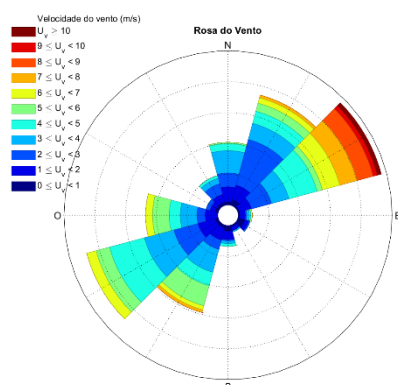


Figura 6-5: Perfil de direção do vento da estação anemométrica TNW 3 no horizonte temporal 16/05/2017 a 06/06/2017.

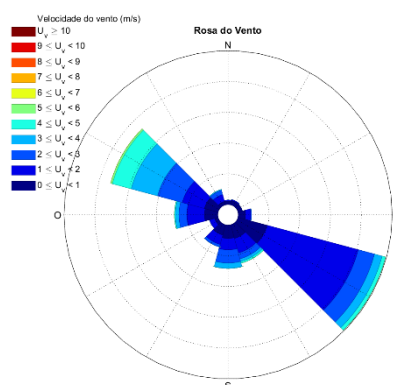


Figura 6-6: Perfil de direção do vento da estação anemométrica TNW 7 no horizonte temporal 16/05/2017 a 06/06/2017.

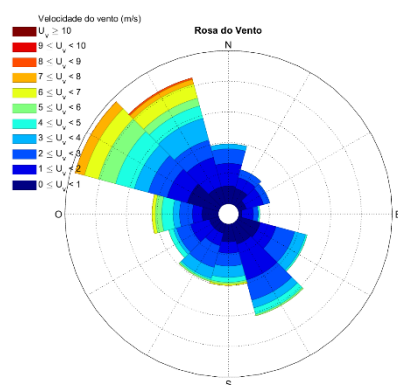


Figura 6-7: Perfil de direção do vento da estação anemométrica TSE 7 no horizonte temporal 16/05/2017 a 06/06/2017.

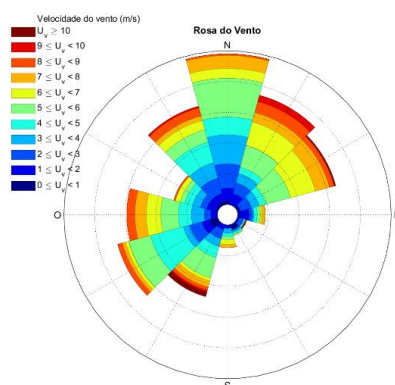


Figura 6-8: Perfil de direção do vento da estação anemométrica TSE 11 no horizonte temporal 16/05/2017 a 06/06/2017.

Desta forma, através das figuras anteriores é possível compreender que existe uma elevada dispersão na direção do recurso. No entanto, é possível inferir a concordância entre as estações localizadas no interior do vale (TNW 7 e TSE 7) com direções predominantes de Sudeste e Noroeste, o que é expectável de acordo com o descrito no subcapítulo 5.1. Relativamente à direção do recurso nas estações no topo das colinas, na colina Norte (TNW3) observam-se direções predominantes de Sudoeste e Nordeste, analogamente a colina Sul (TSE 11) apresenta também as mesmas direções predominantes, embora com uma variabilidade superior.

## 6.2. Análise dos resultados para as diferentes configurações do modelo *WindSim*

Nos subcapítulos seguintes apresenta-se os resultados obtidos. Fundamentalmente a sua análise passa pela avaliação das diferentes configurações do modelo de microescala através de diagramas de caixas de bigodes<sup>m</sup> dos desvios da velocidade do vento e componentes ( $u$  e  $v$ ), erro médio quadrático, envoltória

<sup>m</sup> No diagrama de caixa de bigodes representa-se a mediana - linha vermelha, o quartil 25 e 75 da amostra - limites da caixa, o limite máximo/mínimo - limites pretos - "bigodes" e os valores extremos (outliers) da amostra - cruz vermelha dos valores dos desvios entre os valores observados e estimados considerando todos os registos disponíveis e os 27 pontos de validação.

convexa, séries temporais e rosas-dos-ventos. É de salientar que a metodologia utilizada na presente dissertação começa por identificar a calibração mais adequada do modelo *WindSim* usando as diferentes opções de séries virtuais no plano horizontal. Após identificada a melhor configuração, esta é usada para avaliar as diferentes opções de séries virtuais no plano vertical.

### 6.2.1. Séries virtuais – dependência do plano horizontal (xy)

Nesta secção procede-se a análise do impacto das diferentes configurações dos módulos *Terrain*, *Wind Fields* e *Objects* alimentando o modelo *WindSim* com as diferentes opções das séries virtuais no plano horizontal. Assim, variam-se os seguintes parâmetros: *i*) resolução da malha de simulação (10, 15 e 30 m); *ii*) modelos de turbulência (*k-e*, *RNG* e *k-o*); *iii*) pontos de entrada das séries virtuais (DM, PM e LA).

- Velocidade do vento

Na Figura 6-9 apresentam-se os diagramas de caixa e bigodes dos valores da velocidade do vento para as várias formulações avaliadas.

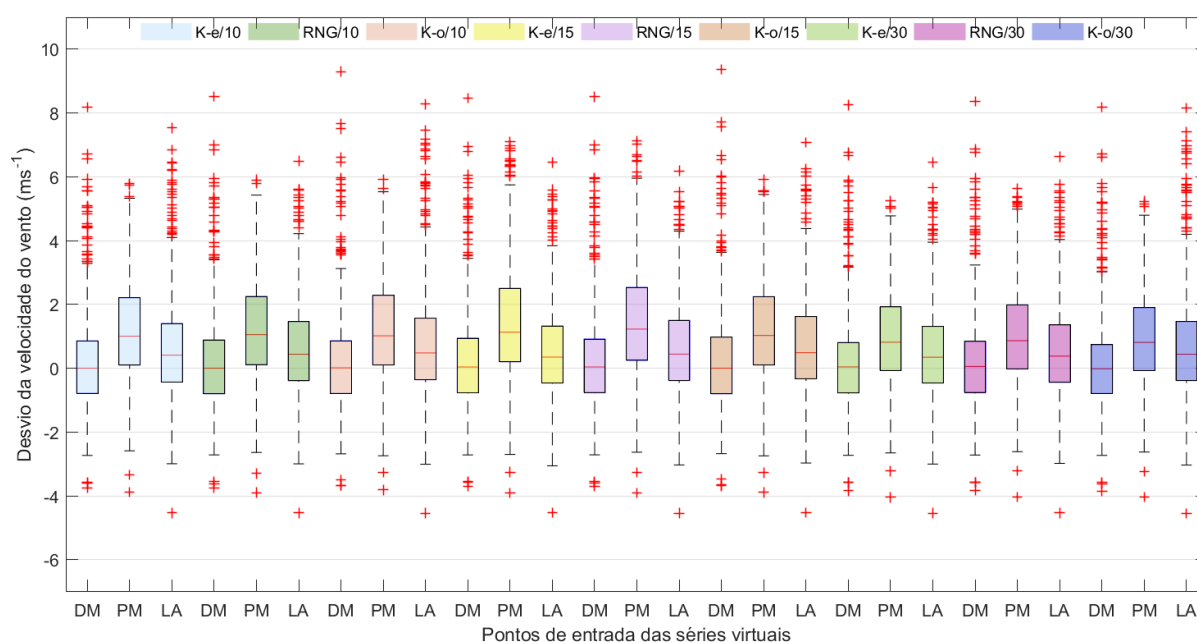


Figura 6-9: Diagrama de caixa e bigodes dos valores do viés (de todos os pontos de validação) da velocidade do vento.

Pela Figura 6-9 é possível inferir que o parâmetro com maior influência no escoamento simulado é o ponto espacial de entrada das séries virtuais. Isto porque, apresenta maior influência nos valores da mediana, amplitude interquartil e limites máximo/interior. Entre os métodos de entrada das séries virtuais o método de diferença mínima (DM) tende a demonstrar melhor desempenho. Ou seja, relativamente às restantes configurações possui: *i*) limite inferior semelhante; *ii*) mediana mais próxima de 0 m/s; *iii*) amplitude interquartil inferior; *iv*) limite superior mais próximo de 0 m/s. Note-se embora, que o número de *outliers* tende a ser superior aos métodos PM e LA, o que sugere elevada dispersão da velocidade do recurso em alguns dos pontos analisados.

Relativamente aos modelos de turbulência infere-se dos resultados que, para os modelos que recorrem à introdução das séries virtuais através do método DM, o *Wilcox k-o model (K-o)* é o que reduz a sobrestimação do escoamento simulado, tendendo para aproximar o limite máximo de zero. Finalmente, a nível resolução da malha de simulação infere-se que a resolução de 30 metros diminui ligeiramente a amplitude interquartil e aproxima os limites máximo/mínimo de zero, isto é, aproxima o escoamento simulado do real.

Salienta-se que o modelo de turbulência com melhor desempenho (*K-o*) se encontra dentro expectável de acordo com as vantagens deste modelo, subcapítulo 2.4.4. Analogamente, o método de introdução das séries virtuais com melhor desempenho (DM) encontra-se dentro do expectável pois minimiza o desvio das elevações entre o ponto de extração dos dados de mesoescala e o ponto de introdução das séries virtuais no modelo de microescala. Contrariamente, seria expectável que a diminuição da resolução da malha de simulação (maior detalhe de simulação) apresentasse um melhor desempenho. Contudo, os resultados não apontam neste sentido, o que pode ser explicado por uma elevada interferência dos efeitos de microescala, induzindo uma sobrestimação do escoamento simulado. Neste sentido desenvolve-se uma necessidade de uma validação aprofundada deste parâmetro (resolução da malha).

- Componente  $u$  do vento

Na Figura 6-10, relativa ao viés da componente  $u$  da velocidade do vento, observa-se que os resultados seguem no mesmo sentido que os da velocidade do vento (Figura 6-9), com exceção de: *i)* ligeiro aumento dos limites máximos e mínimos do modelo de turbulência *K-o* relativamente ao *K-e*; *ii)* aumento do número e magnitude dos valores extremos (*outliers*) tanto de sobrestimação como subestimação. Note-se embora que, em geral, é possível concluir que o método DM tende para a sobrestimação da componente  $u$  da velocidade do vento.

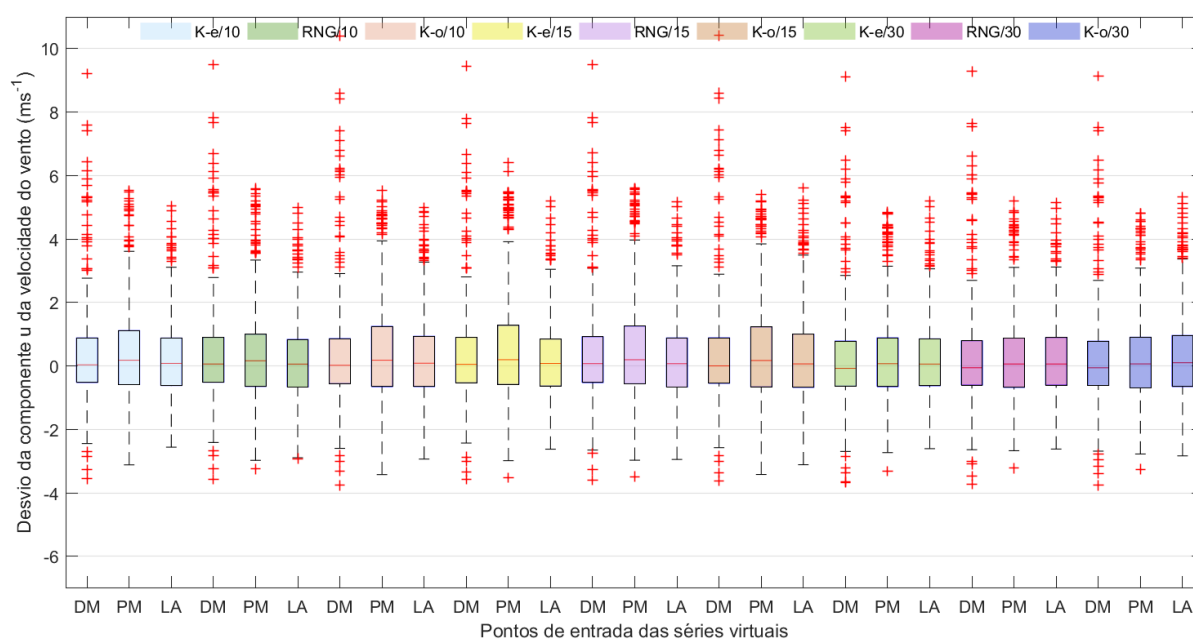


Figura 6-10: Diagrama de caixa e bigodes dos valores da componente  $u$  da velocidade do vento.

- Componente  $v$  do vento

Relativamente à componente  $v$  da velocidade do vento, Figura 6-11, observa-se que o método com uma mediana mais próxima de zero é o LA, não obstante, tende a possuir uma amplitude interquartil e limite máximo semelhantes ao método DM. Ou seja, o método DM embora não possua a performance do método LA, globalmente tende a conseguir captar com boa performance a componente  $v$  da velocidade do vento. Salienta-se o *i*) número e a magnitude dos *outliers* de subestimação, *ii*) e o desvio da mediana no sentido negativo, que levam a concluir que este método subestima a presente componente do vento.

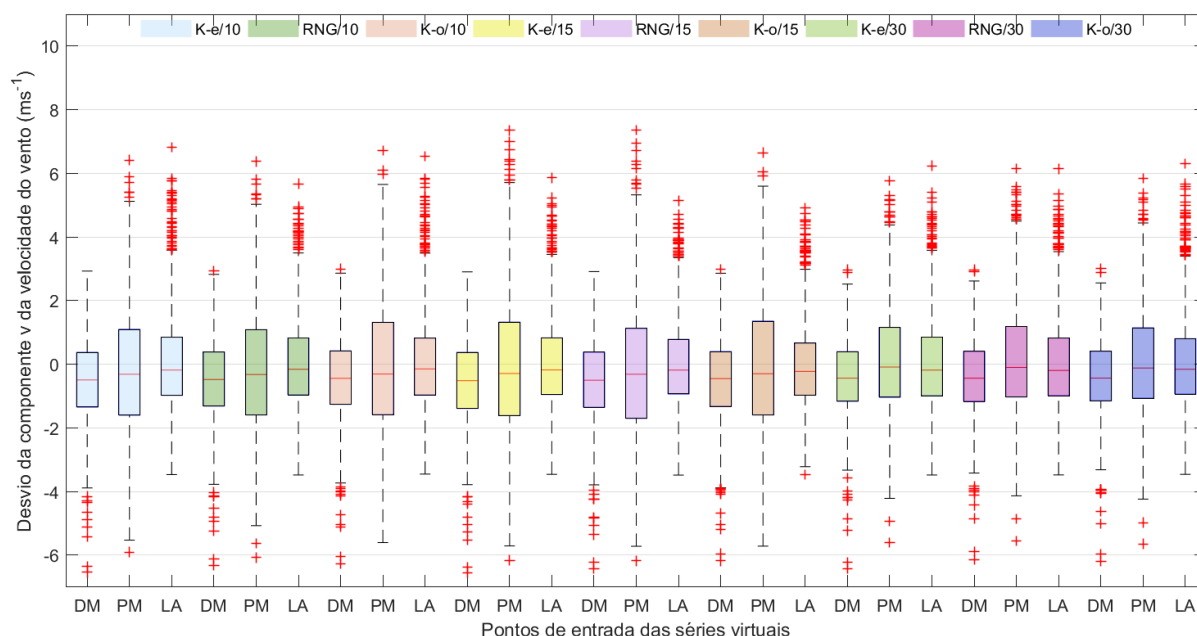


Figura 6-11: Diagrama de caixa e bigodes dos valores da componente  $v$  da velocidade do vento.

- RMSE da intensidade e componentes  $u$  e  $v$  do vento

Na Figura 6-13, Figura 6-14 e Figura 6-12 apresentam-se os erros médios quadráticos (RMSE) das diferentes formulações dos modelos avaliados da velocidade e componentes do vento. Sendo possível, concluir que a configuração do modelo com um menor RMSE, para a velocidade do vento e componente  $v$  da velocidade do vento, é a  $K-o/DM/30$ . Relativamente à componente  $u$  da velocidade do vento tem-se que a opção  $K-e/LA/30$  é a que apresenta o RMSE inferior.

Salienta-se através do denominador comum entre as formulações, o reforço que a resolução de simulação de 30 metros tende a apresentar melhores resultados. Salienta-se igualmente, as dificuldades da captação da componente  $u$  da velocidade do vento por parte da configuração  $K-o/DM/30$ , o que se encontra de acordo com as evidências da Figura 6-10, ou seja, o elevado número e magnitude dos *outliers*.

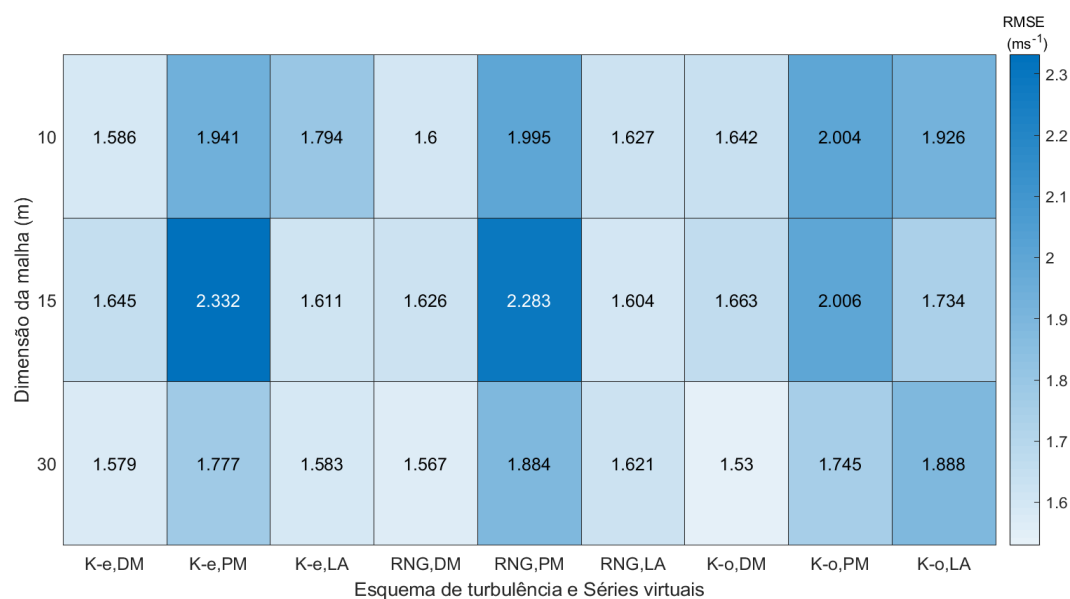


Figura 6-12: RMSE da velocidade do vento.

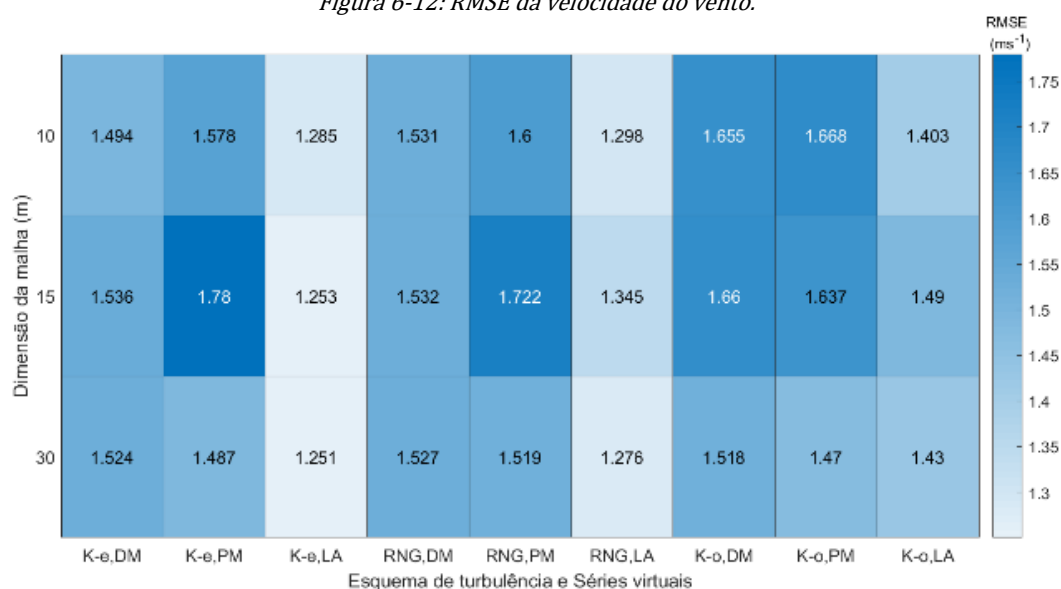


Figura 6-13: RMSE da componente u velocidade do vento.

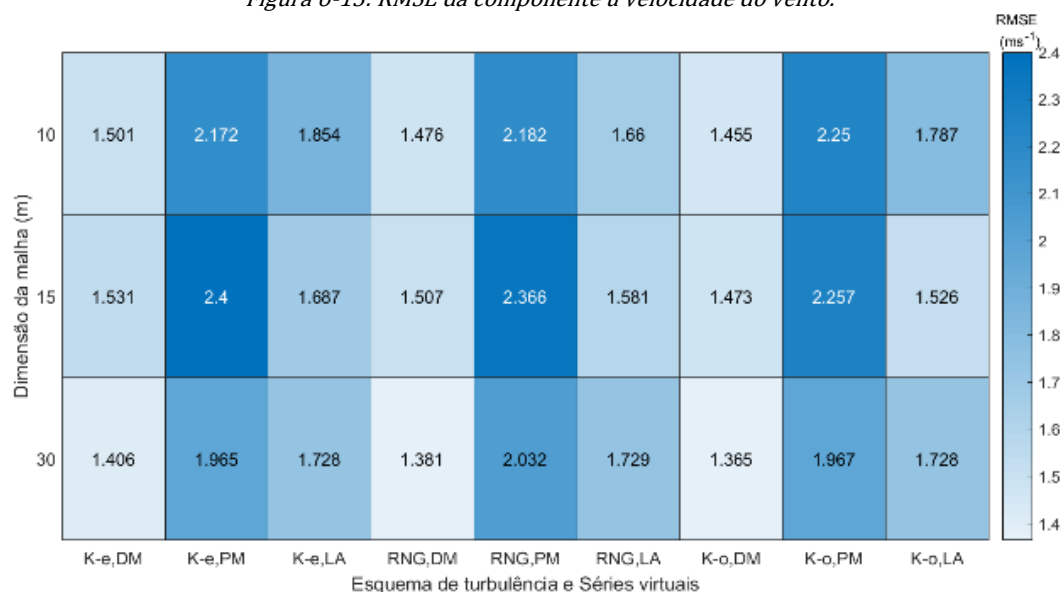


Figura 6-14: RMSE da componente v velocidade do vento.



- Envoltória convexa

Na Figura 6-15 apresenta-se a envoltória convexa, ou seja, os conjuntos/domínios dos três métodos de introdução das séries virtuais e dos dados reais. Nesta figura, comparando-se os resultados dos métodos com as observações onde é possível notar que os métodos PM e LA sobrestimam a velocidade do vento com orientações do 1º quadrante e do 4º quadrante, notando-se que na última orientação a sobrestimação é menos acentuada. Relativamente às orientações do 2º e 3º quadrante observa-se sobrestimação/subestimação ligeira, demonstrando um desempenho superior destes métodos relativamente aos outros quadrantes.

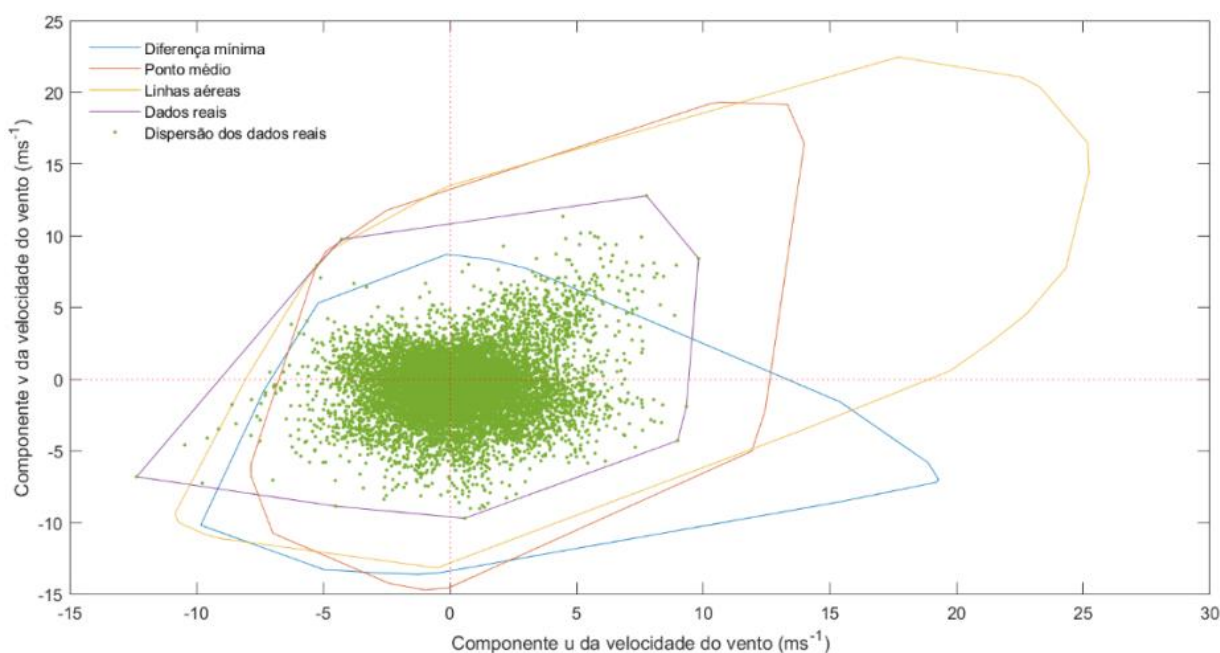


Figura 6-15: Envoltória convexa dos métodos de introdução das séries virtuais.

Relativamente ao método DM, e realizando a síntese dos resultados demonstrados na Figura 6-15, infere-se a: i) subestimação da velocidade do vento com orientação do 1º quadrante; ii) sobrestimação no 4º quadrante superior aos métodos PM e LA; iii) desempenho similar aos métodos PM e LA no 2º e 3º quadrantes.

Em termos do *design* e área dos domínios dos métodos analisados, o que apresenta maior similaridade com o domínio dos dados reais é o método DM. Salientando-se que, para a componente *v* se observa uma inversão na captação da sua intensidade, conforme-se expectável perante a Figura 6-11.

- Análise detalhada dos resultados dos testes sensibilidade à resolução espacial

Dado que, a resolução da malha de 30 metros apresenta melhores resultados, o que não se encontra de acordo com o espectável, apresenta-se na Figura 6-16 o viés da componente *u* da velocidade do vento, para as diferentes resoluções da malha de simulação para a configuração com o modelo de turbulência – *K- $\omega$*  e o método de introdução das séries virtuais – DM. Através desta figura é possível inferir: i) a malha com a dimensão de 30 metros possui um número semelhante de *outliers*, mas com magnitudes inferiores; ii) a mediana, quartis e limites mantêm-se aproximadamente iguais entre malhas. Em face dos resultados obtidos, o desempenho superior da resolução espacial de 30 m pode ser parcialmente explicado pelo efeito de suavização do terreno introduzido por esta resolução.



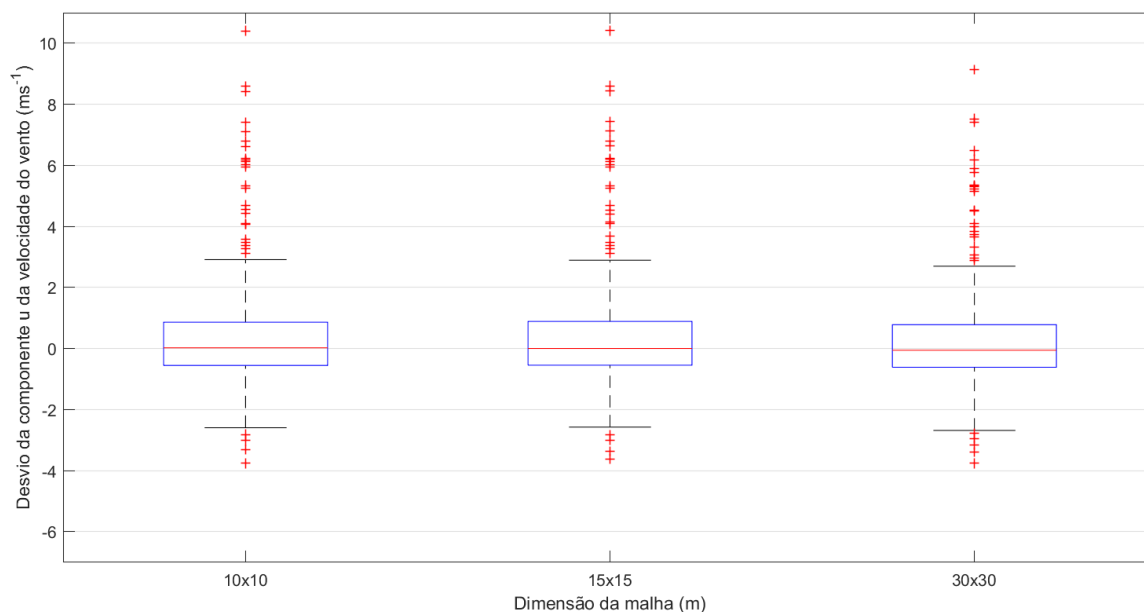


Figura 6-16: Diagrama de caixa e bigodes dos valores dos desvios da componente  $u$  da velocidade do vento para as diferentes resoluções de simulação da configuração: i) DM; ii) K-o.

Analogamente à figura anterior, na Figura 6-17, é possível inferir, para a componente  $v$  da velocidade do vento, que: i) entre as dimensões das malhas os quartis, mediana e *outliers* mantêm-se semelhantes; ii) a dimensão da malha de resolução de 30 metros possui limites máximo/mínimo inferiores.

Através dos resultados anteriores, não sendo estes de acordo com o espectável, não é possível definir de forma clara a melhor resolução da malha de simulação. Desta forma segue-se a análise para as malhas de 10 e 30 metros pois é possível inferir, particularmente através da Figura 6-12, Figura 6-13 e Figura 6-14, a configuração DM/K-o é a que apresenta melhor desempenho.

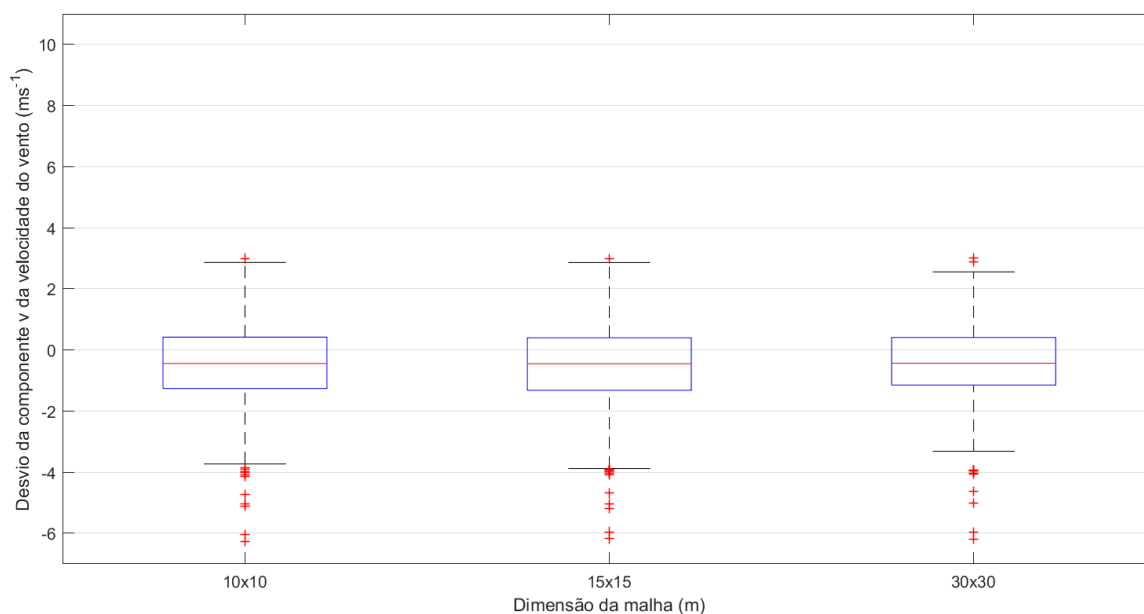
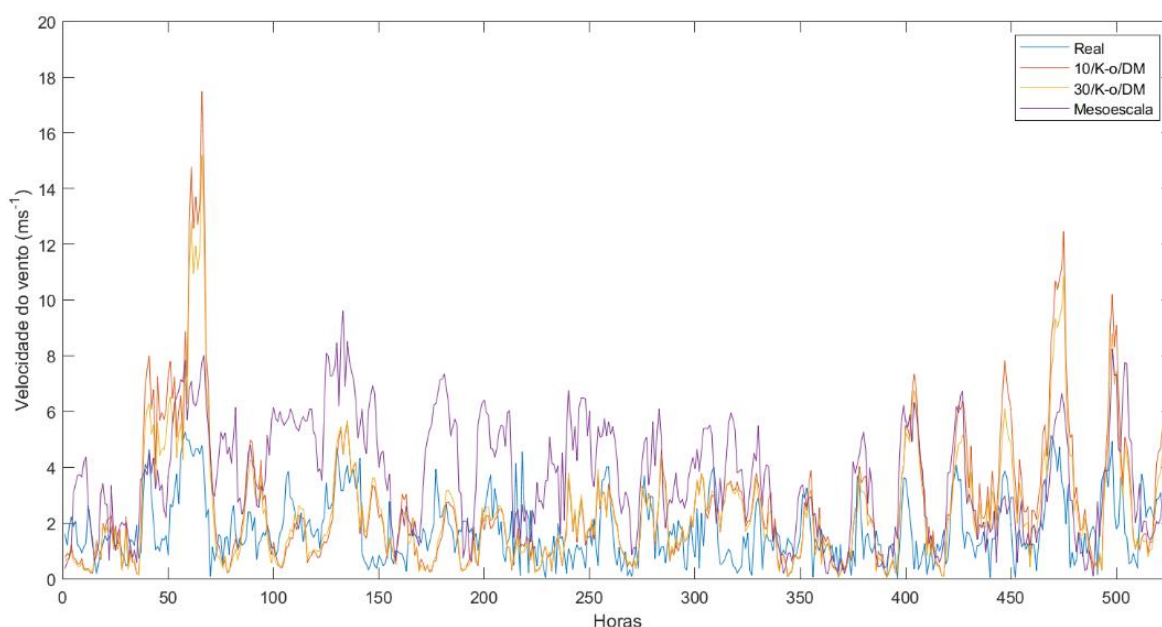


Figura 6-17: Diagrama de caixa e bigodes dos desvios da componente  $v$  da velocidade do vento para as diferentes resoluções de simulação da configuração DM/K-o.

De forma a comparar resultados com outros modelos numéricos de diferente conceção, apresenta-se a Figura 6-18 e Figura 6-19 com os perfis horários da velocidade do vento: i) real; ii) 10/K-o/DM; iii) 30/K-o/DM; e iv) mesoescala. Estes perfis permitem inferir que as formulações – 10/K-o/DM e 30/K-o/DM se aproximam mais do perfil real do que o modelo de mesoescala. Excetuando nos períodos contidos entre as 50-75 horas e 475-500 horas onde se observa um desvio acentuado relativamente ao perfil de escoamento real, sendo, inclusivamente, superior ao do modelo de mesoescala.

Relativamente à comparação entre formulações do modelo de microescala, infere-se que a configuração 30/K-o/DM consegue aproximar-se mais do perfil de escoamento real. Esta conclusão é corroborada pelo valor do RMSE da opção 30/K-o/DM ( $1,530 \text{ ms}^{-1}$ ) ser inferior à formulação 10/K-o/DM ( $1,624 \text{ ms}^{-1}$ ), Figura 6-13. Finalmente nas estações TNW 7 e TSE 7 nota-se que, para uma localização com uma cota superior, ambas as configurações do modelo se aproximam mais do perfil do escoamento observado, Figura 6-19.



*Figura 6-18: Perfis (real, mesoescala, 10/K-o/DM e 30/K-o/DM) da velocidade do vento da estação anemométrica TNW 7 no horizonte temporal 16/05/2017 a 06/06/2017.*

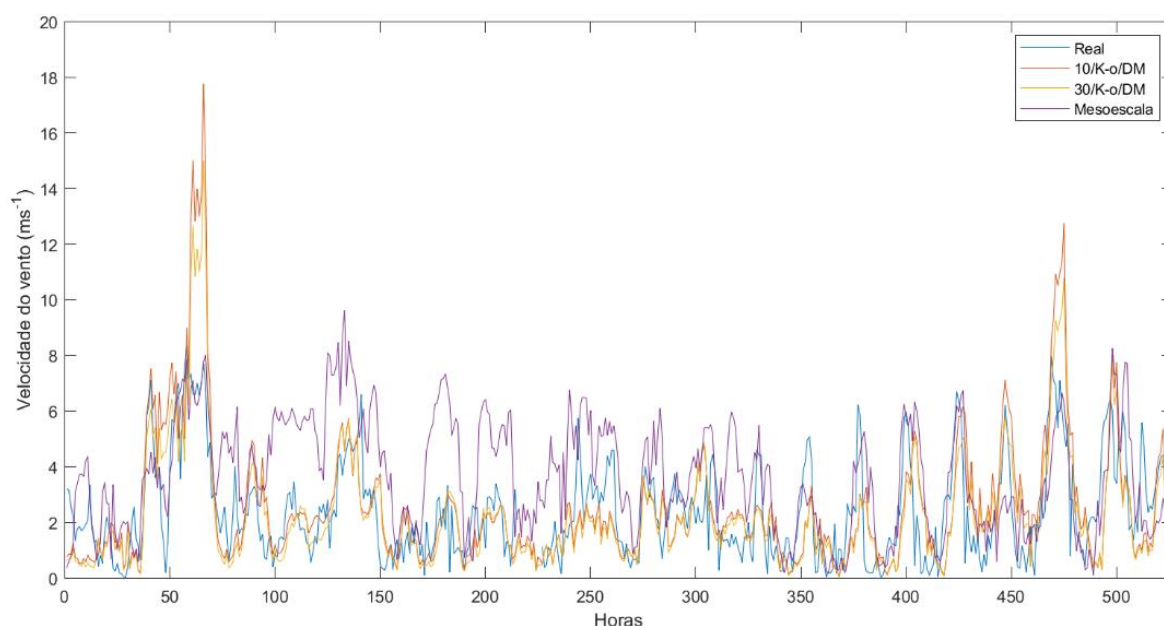


Figura 6-19: Perfis (real, mesoescala, 10/K-o/DM e 30/K-o/DM) da velocidade do vento da estação anemométrica TSE 7 no horizonte temporal 16/05/2017 a 06/06/2017.

- Análise por sectores de direcção

As Figura 6-20 à Figura 6-27 avaliam o escoamento atmosférico simulado em termos de direcção, e permite a sua comparação direta com a Figura 6-5, Figura 6-6, Figura 6-7 e Figura 6-8 onde se analisa para os mesmos pontos espaciais o perfil do escoamento atmosférico real.

Através da comparação antes enunciada, é possível notar que tanto para cotas geográficas superiores (TNW 3 e TSE 11) como inferiores (TNW 7 e TSE 7) a opção 30/K-o/DM tende a captar melhor o perfil de direcção do escoamento atmosférico observado. Contudo, salienta-se as dificuldades de ambas configurações em se aproximar do escoamento observado, o que é espectável devido às inerentes dificuldades dos modelos de microescala, subcapítulo 1.3, captarem corretamente a natureza estocástica da direcção do vento.

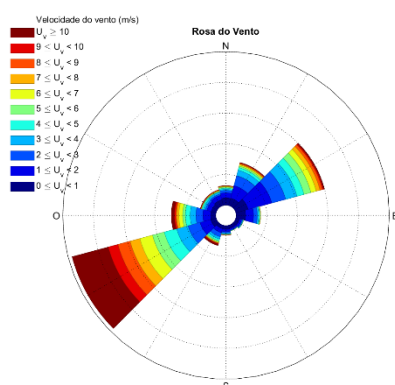


Figura 6-20: Perfil da orientação do vento simulado (10/K-o/DM) da estação anemométrica TNW 3.

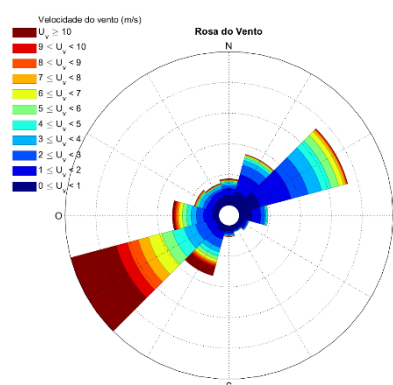


Figura 6-21: Perfil da orientação do vento simulado (30/K-o/DM) da estação anemométrica TNW 3.

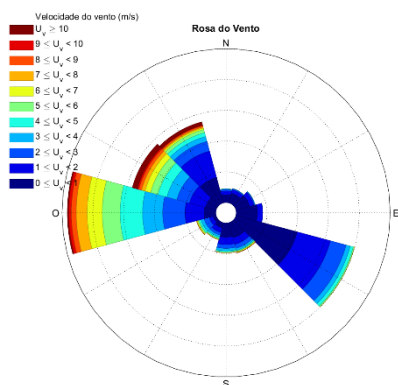


Figura 6-22: Perfil da orientação do vento simulado (10/K-o/DM) da estação anemométrica TNW 7

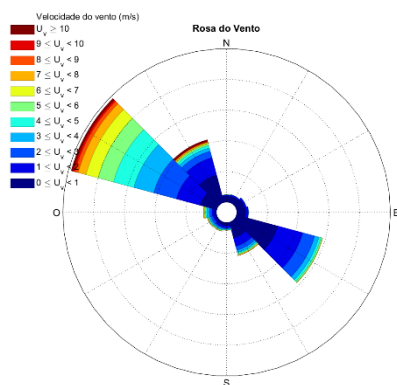


Figura 6-23: Perfil da orientação do vento simulado (30/K-o/DM) da estação anemométrica TNW 7.

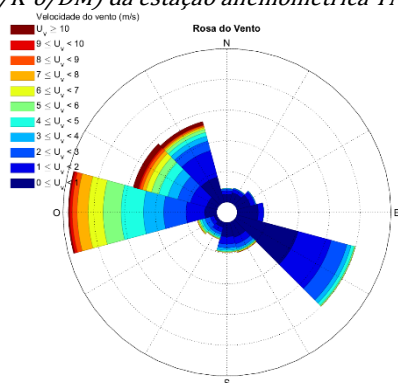


Figura 6-24: Perfil da orientação do vento simulado (10/K-o/DM) da estação anemométrica TSE 7.

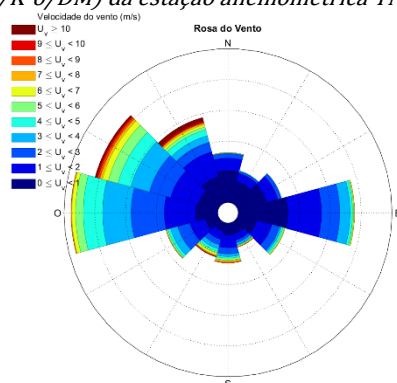


Figura 6-25: Perfil da orientação do vento simulado (30/K-o/DM) da estação anemométrica TSE 7.

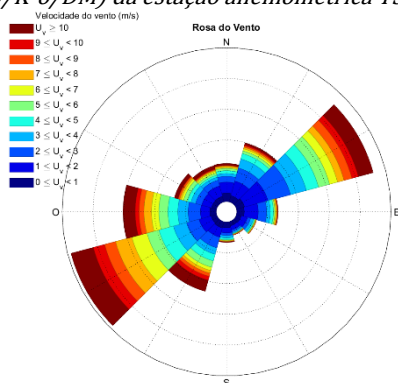


Figura 6-26: Perfil da orientação do vento simulado (10/K-o/DM) da estação anemométrica TSE 11.

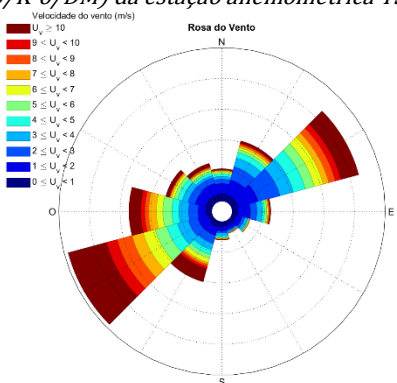


Figura 6-27: Perfil da orientação do vento simulado (30/K-o/DM) da estação anemométrica TSE 11.

No sentido do finalizar a análise da dependência do plano  $xy$ , conclui-se que as configurações que apresentaram melhor desempenho, são: i) 10/K-o/DM; ii) 30/K-o/DM. Esta escolha baseou-se nas seguintes premissas:

- Método de introdução de séries virtuais no plano  $xy$  com os parâmetros estatísticos analisados mais próximos da performance ideal;
- Modelo de turbulência com performance superior;
- Sendo que resolução da malha de simulação com melhor performance é a de 30 metros, mas a expectável seria a de 10 metros, optou-se por seleccionar ambas resoluções para análise posterior usando as diferentes opções das séries virtuais no plano vertical.

### 6.2.2. Séries virtuais – dependência do plano vertical (z)

Nesta secção são analisados os resultados, referentes à calibração no plano vertical da introdução de séries virtuais, que avalia a influência da altura de entrada das séries virtuais apenas para as duas configurações que apresentaram melhor desempenho no passo anterior: i) 10/K-o/DM; ii) 30/K-o/DM.

- Velocidade do vento

Na Figura 6-28 apresentam-se os diagramas de caixa e bigodes dos valores da velocidade do vento para as seis configurações avaliadas. Através esta figura é possível inferir que entre as alturas avaliadas, a altura de 80 metros é a que demonstra: i) medianas mais próximas de zero; ii) menores amplitudes interquartil; iii) limites superior mais próximos de 0 m/s; iv) limites inferiores semelhantes às formulações com 598 metros; v) *outliers* de sobrestimação com maior magnitude; vi) número de outliers próximo das restantes alturas. De acordo com os pontos identificados, é possível concluir com base no viés da velocidade do vento que a altura de 80 metros apresenta melhor desempenho. Salientando-se, no entanto, a subsistência da tendência de sobrestimar a intensidade do recurso por parte das formulações do modelo desenvolvido.

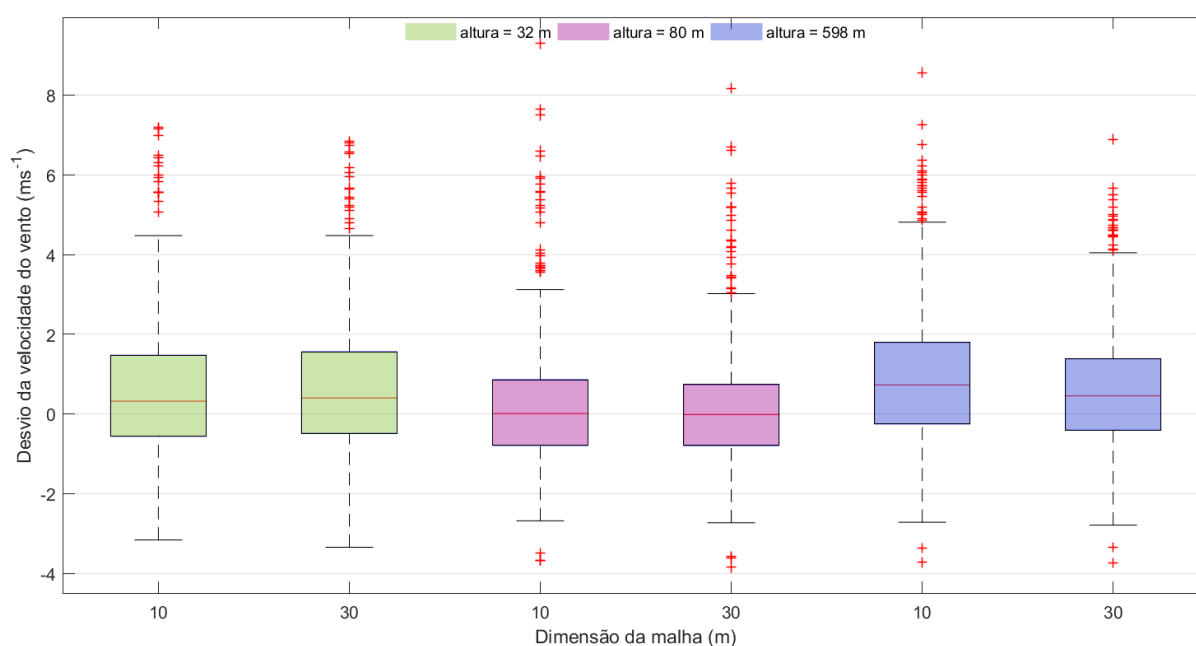


Figura 6-28: Diagrama de caixa e bigodes dos valores da velocidade do vento.

Relativamente às resoluções da malha de simulação, mantêm-se as características inferidas na Figura 6-9, ou seja, ambas resoluções (10 e 30) possuem medianas e limites máximos idênticos. Sendo que os aspetos que sugerem melhor desempenho da resolução de 30 metros são: i) menor amplitude interquartil, e ii) menor magnitude dos *outliers* de sobrestimação.

- Componente  $u$  do vento

Na Figura 6-29 apresenta-se o viés da componente  $u$  da velocidade do vento, inferindo-se que a simulações que usam altura de 80 metros aproximam-se mais dos dados observados possuindo: i)

medianas mais próximas de zero; *ii*) menores amplitudes interquartil significando que a dispersão dos desvios é menor e concentrada numa região mais próxima de 0 m/s (valor ideal); *iii*) limites superior/inferior mais próximos de zero; e *v*) número de *outliers* próximo das restantes alturas. Analisando as malhas de resolução (10 e 30 m), para a altura de 80 metros, observa-se que estas apresentam um comportamento semelhante, contudo a distância interquartil e os limites apresentam valores mais reduzidos e próximos de 0 m/s na malha de 30 metros.

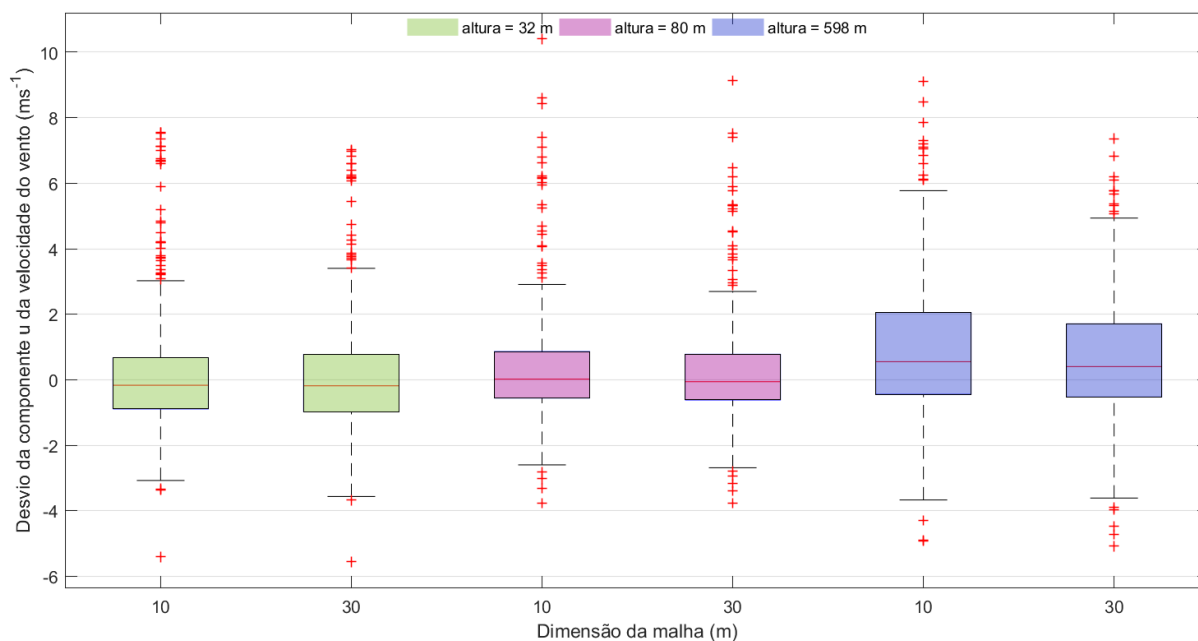


Figura 6-29: Diagrama de caixa e bigodes dos valores da componente u da velocidade do vento.

- Componente v do vento

A Figura 6-30 apresenta o viés da componente v da velocidade do vento, que permite depreender que a altura de entrada das séries virtuais com performance superior é a de 80 metros, uma vez que possui menores amplitudes interquartil e número/magnitude inferior de *outliers* com sobrestimação desta componente do vento. Note-se embora, que a altura de 598 metros possui medianas inferiores e número/magnitude de *outliers* de subestimação inferiores. Concluindo-se que, a altura de 80 metros possui a tendência de subestimação do componente v da velocidade do vento.

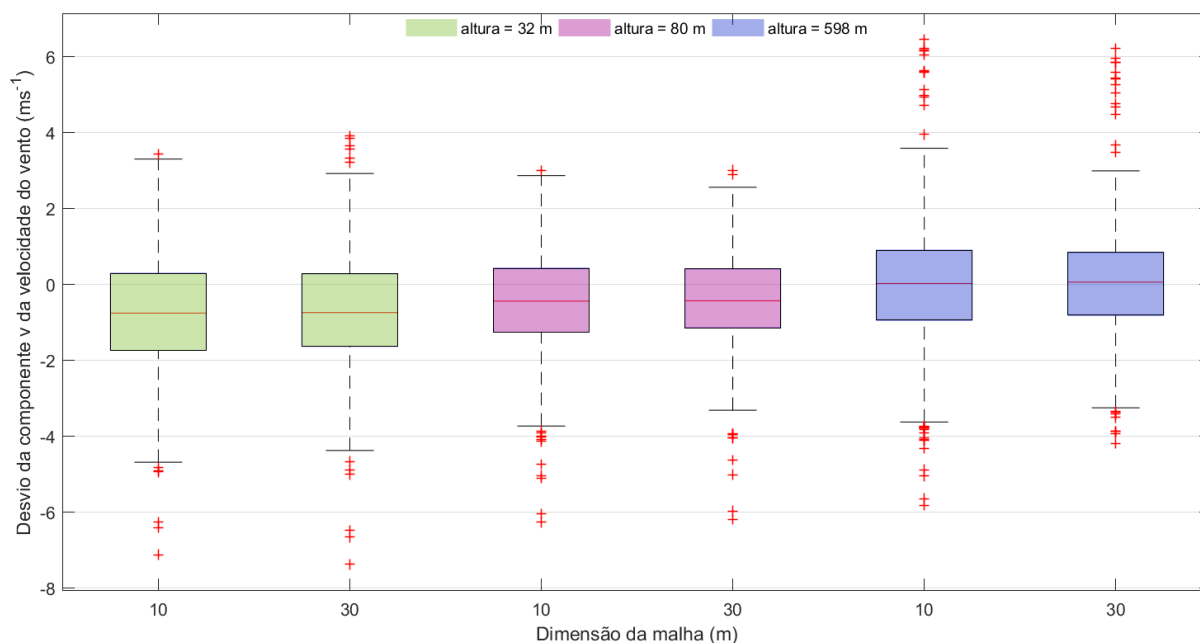


Figura 6-30: Diagrama de caixa e bigodes dos valores da componente  $v$  da velocidade do vento.

- RMSE da intensidade e componentes  $u$  e  $v$  do vento

O RMSE das seis configurações avaliadas são exibidos na Figura 6-32, Figura 6-33 e Figura 6-31, permitindo inferir que a série virtual para os 80 metros usando uma resolução espacial de 30 m é a que apresenta um RMSE mais próximo de zero, tanto para velocidade do vento como para as suas componentes. Este resultado encontra-se de acordo com o expectável e observado através da Figura 6-28, Figura 6-29 e Figura 6-30.

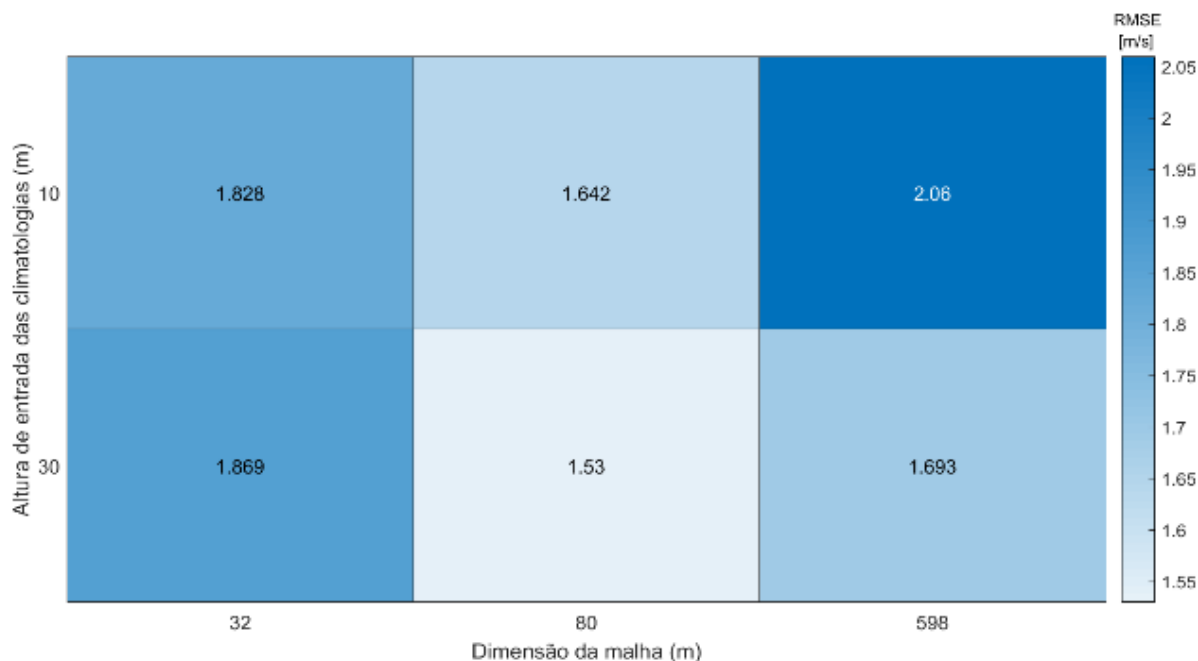


Figura 6-31: RMSE da velocidade do vento.

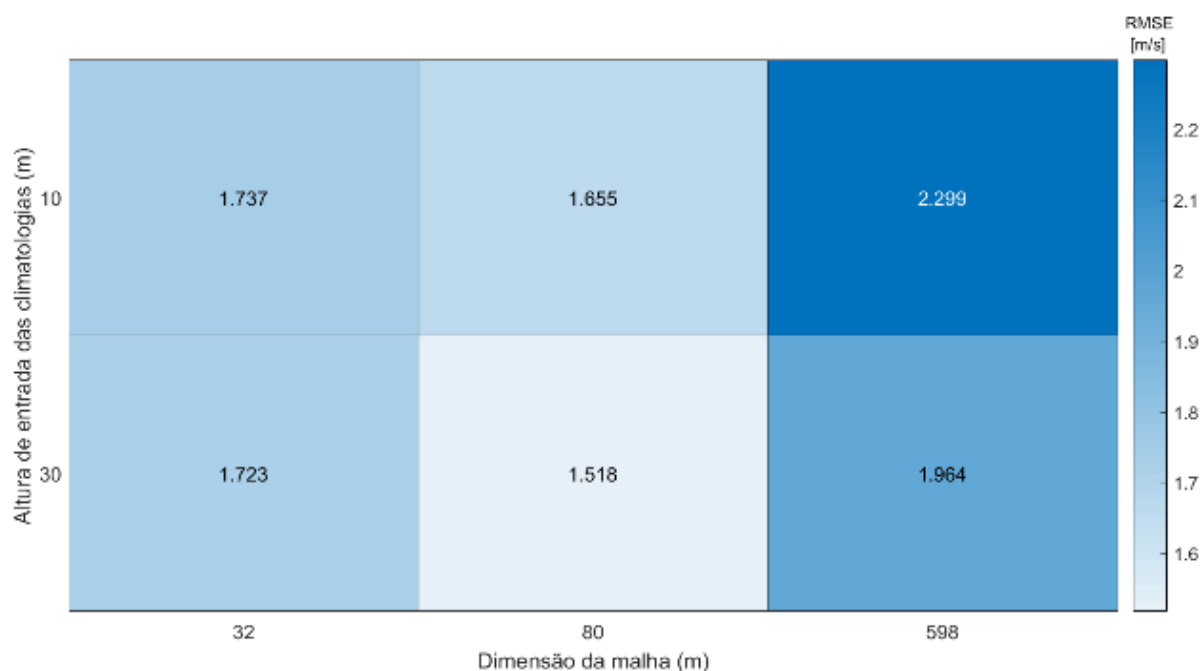


Figura 6-32: RMSE da componente u da velocidade do vento.

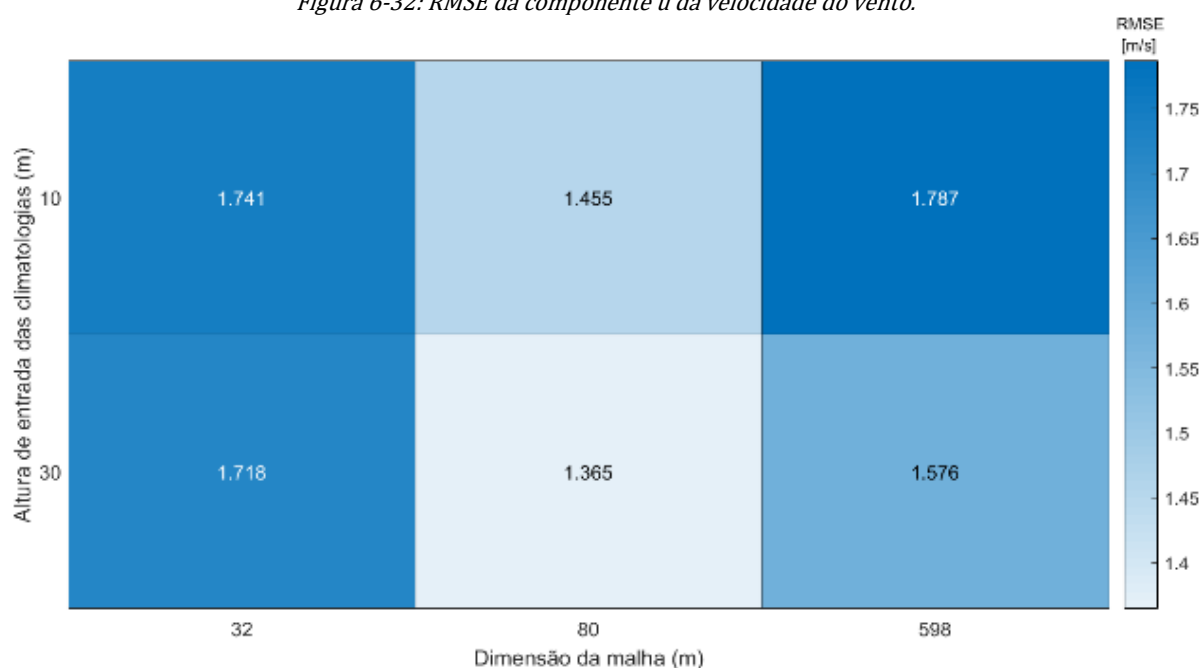


Figura 6-33: RMSE da componente v da velocidade do vento.

- Envoltória convexa

A Figura 6-34 demonstra as envoltórias convexas que permitem a comparação entre os conjuntos/domínios das configurações avaliadas e dos dados reais. Através desta comparação é possível inferir que a configuração com altura de 32 metros possui o domínio mais próximo do domínio dos dados reais. Com exceção do 3º quadrante que apresenta elevada subestimação da velocidade do vento com orientação deste quadrante. Note-se que, para este quadrante o domínio mais próximo do domínio dos dados reais corresponde à formulação com altura de 598 metros.



Através da Figura 6-34 é perceptível que a formulação com altura de 80 metros sobrestima a componente  $u$  e subestima a componente  $v$ , o que se encontra de acordo com o inferido na Figura 6-29 e Figura 6-30. Porém analisando a dispersão dos valores reais (elevada densidade próxima da origem), para ambas as componentes da velocidade do vento, esta configuração é a que apresenta melhor desempenho pois possui um domínio mais centrado em redor da origem, o que aproxima o viés e o RMSE dos valores ótimos. Concluindo-se que, embora a configuração usando a série virtual extraída para os 80 metros de altura apresente um domínio mais afastado do domínio dos dados reais, a dispersão dos registos reais confere a esta configuração, em termos quantitativos, o melhor desempenho.

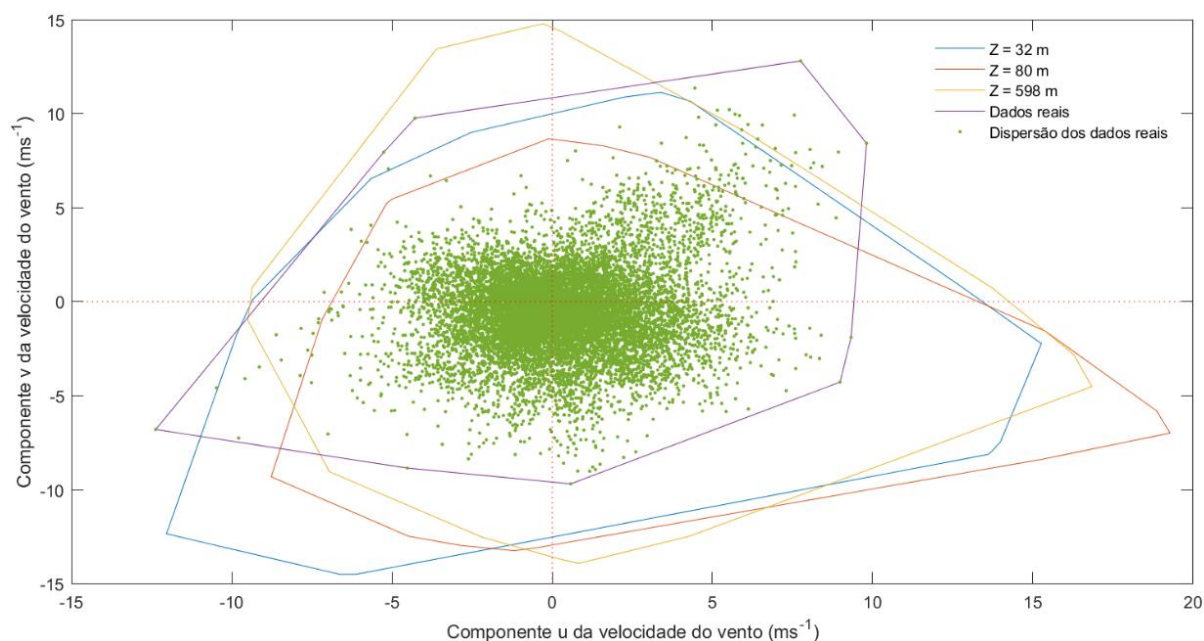


Figura 6-34: Envoltória convexa dos métodos de introdução das séries virtuais.

- Análise detalhada dos resultados – séries temporais

No sentido de comparar os resultados com outros modelos de diferente conceção, apresentam-se Figura 6-35 e Figura 6-36 os perfis horários da velocidade do vento: *i*) real; *ii*) 30/32; *iii*) 30/80; *iv*) 30/598 e *v*) mesoescala. Os perfis apresentados em ambas as figuras permitem inferir que as configurações do modelo avaliadas apresentam comportamentos semelhantes, aproximando-se mais do perfil real do que o modelo de mesoescala, excetuando nos períodos contidos entre as 50-75 horas e 475-500 horas onde se observa um desvio acentuado da perfil simulado em relação ao perfil real, sendo inclusivamente superior ao perfil do modelo de mesoescala.

Analisando as diferentes formulações do modelo de microescala é possível inferir que entre as alturas de entrada das séries virtuais, para ambas malhas de resolução espacial (10 e 30), a altura de 80 metros tende a aproximar-se mais do perfil do vento real. Assim, os resultados sugerem que alimentar o modelo *WindSim* com séries virtuais para alturas próximas do solo (32 metros) ou muito afastadas do mesmo (e.g., altura da CLA) pode não corresponder à melhor opção para obtenção das estimativas da intensidade e direção do vento. Este resultado pode ser parcialmente explicado por: *i*) os dados extraídos do modelo de mesoescala aos 32 metros apresentarem ainda perturbações associadas às condições de fronteira à superfície, não sendo possível o modelo de microescala atenuar estes efeitos, e *ii*) os dados extraídos para os 598 metros não conterem variabilidade desencadeada dentro da CLA relevante para o caso de estudo em análise. Relativamente às diferenças dos perfis impostos pela resolução espacial da

malha, observa-se que a malha de 30 metros apresenta perfis mais próximos do perfil real, o que se encontra de acordo com os resultados e aferições anteriormente observadas.

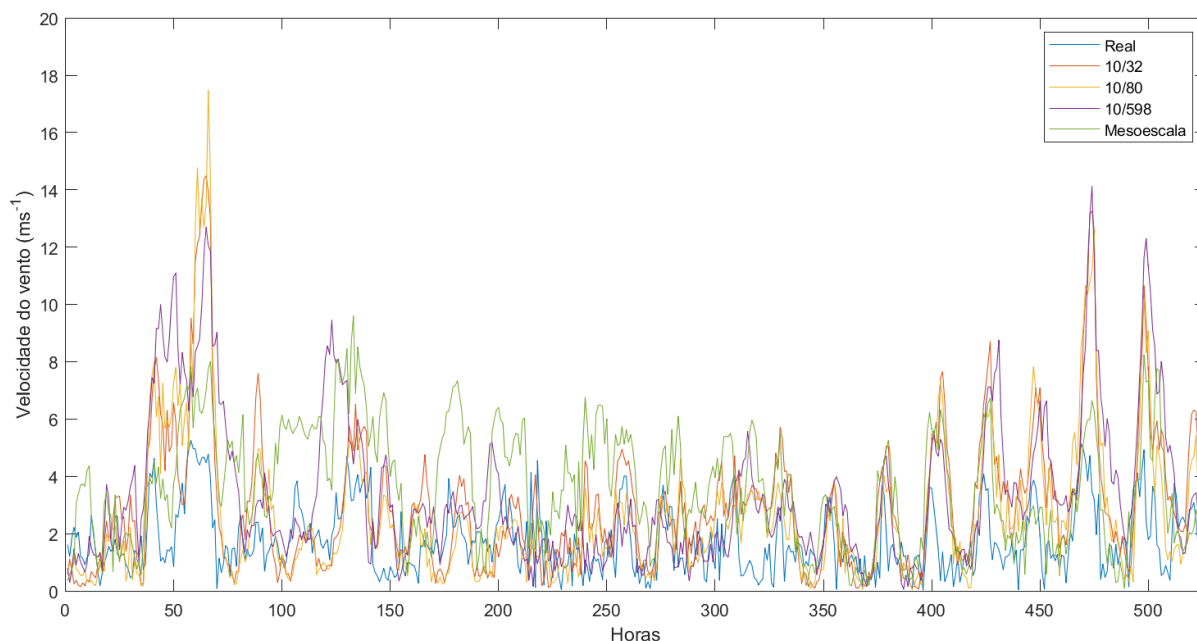


Figura 6-35: Perfis (real, mesoescala, 32 metros, 80 metros e 598 metros) de velocidade do vento da estação anemométrica TNW 7 no horizonte temporal 16/05/2017 a 06/06/2017 e malha de resolução de 10 metros.

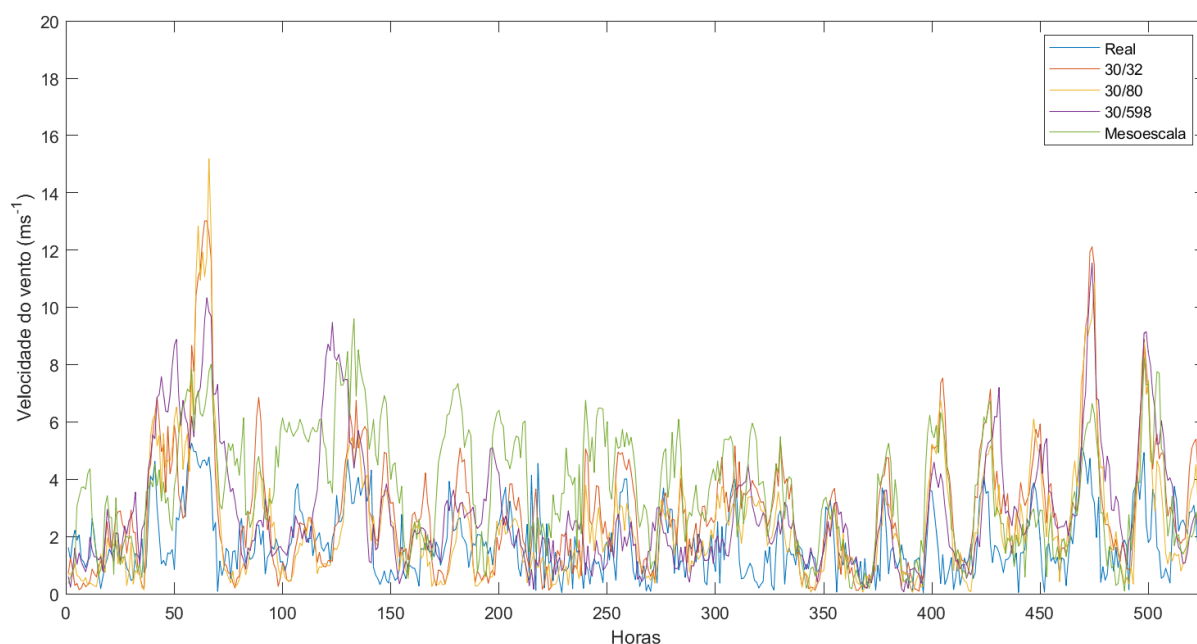


Figura 6-36: Perfis (real, mesoescala, 32, 80 e 598 metros) de velocidade do vento da estação anemométrica TNW 7 no horizonte temporal 16/05/2017 a 06/06/2017 e malha de resolução com 30 metros.

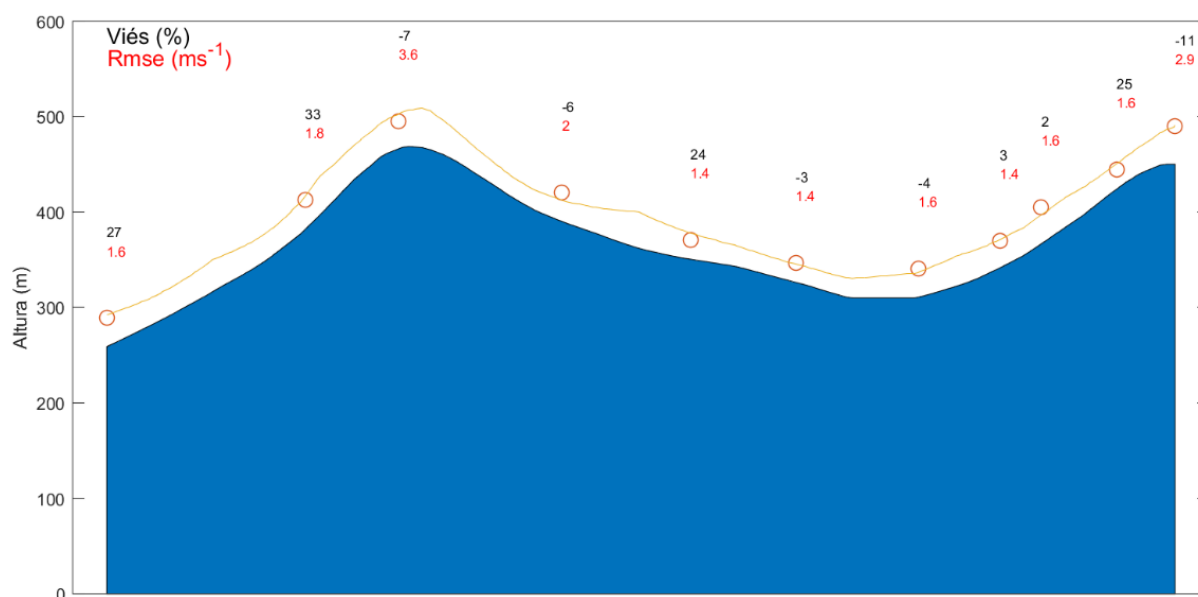
### 6.2.3. Síntese resultados - configuração do modelo

Neste ponto da avaliação dos resultados é possível concluir que a formulação com melhor desempenho possui as características presentes na Tabela 6-1.

*Tabela 6-1: Características selecionadas da configuração do modelo microescala com melhor desempenho.*

Característica	Selecionada
Modelo de turbulência	<i>K-o model of Wilcox (K-o)</i>
Resolução da malha de simulação	30 metros
Ponto de entrada das séries virtuais (plano xy)	Diferença mínima (DM)
Ponto de entrada das séries virtuais (plano z)	80 metros

No intuito de avaliar geograficamente o desempenho da configuração/calibração selecionada apresentam-se o viés (normalizado pelo valor médio observado em cada estação) e o RMSE para cada uma das LA virtuais analisadas neste trabalho, Figura 6-37 e Figura 6-38. Na LA Sul observa-se que o viés sugere a sobrestimação da intensidade do vento nas encostas e subestimação nos topos e vale. Note-se que a sobrestimação tende a possuir magnitudes superiores à subestimação. Relativamente ao RMSE infere-se que na LA Sul, analogamente à LA Norte (Figura 6-38), o erro é maior nos cumes do que nos vales e encostas. Este resultado é parcialmente justificado pelos valores mais elevados da intensidade do vento nos cumes.



*Figura 6-37: Viés (normalizado pela intensidade média do vento) e RMSE da configuração selecionada em termos geográficos da LA Sul.*

Relativamente à LA Norte, a tendência dos resultados mantém-se relativamente à LA Sul. Neste sentido, é possível inferir através do viés que nos topos da montanha o modelo tende a subestimar a intensidade do vento nas encostas, e sobrestimar nos cumes com magnitudes superiores. No entanto, contrariamente à LA Sul, observa-se que no vale ocorre a sobrestimação da velocidade do vento. Relativamente ao RMSE observa-se que a magnitude é superior nos cumes do que nas encostas e vale.

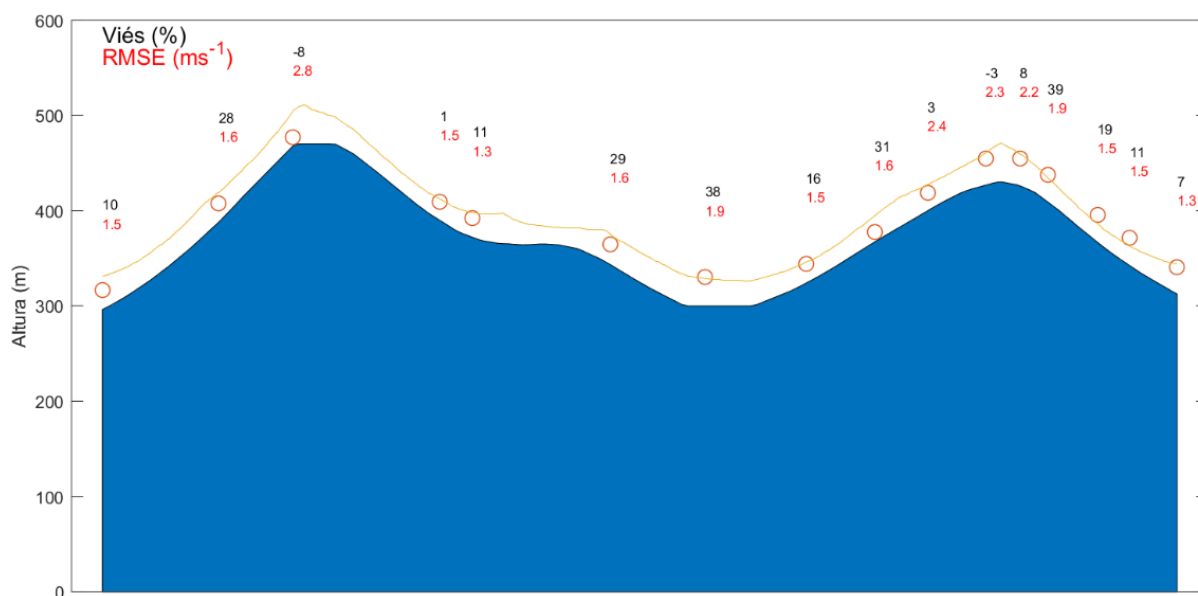


Figura 6-38: Viés (normalizado pela intensidade média do vento) e RMSE da configuração seleccionada em termos geográficos da LA Norte.

- Aplicação do modelo Wind Sim vs resultados do modelo mesoescala

Na Figura 6-39 apresenta-se o RMSE e desvio da velocidade do vento da formulação seleccionada (30/K-o/DM) e do modelo de mesoescala (neste caso os dados foram extraídos do modelo de mesoescala para as coordenadas e alturas das LAs idealizadas). Sendo possível inferir que a formulação seleccionada possui relativamente ao modelo de mesoescala um desempenho superior devido à: i) mediana mais próxima de 0 m/s; ii) menor amplitude interquartil; iii) limite superior mais próximo de 0 m/s; iv) limite inferior semelhante ao modelo de mesoescala. Inclusivamente salienta-se que o modelo de mesoescala apresenta o quartil 25 superior a 0 m/s, o que sugere uma elevada sobrestimação da intensidade do vento, o que se encontra de acordo com a Figura 6-35 e Figura 6-36.

Relativamente aos desvios apresentados na Figura 6-39, reforça-se a conclusão de que a configuração 30/K-o/DM possui um desempenho superior ao modelo de mesoescala, com menor tendência de sobrestimação da intensidade do vento.

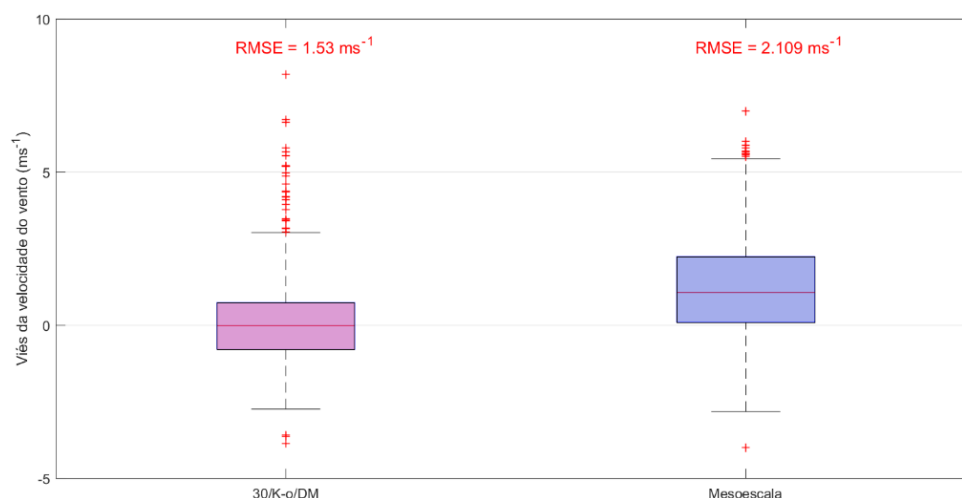


Figura 6-39: Diagrama de caixa e bigodes dos desvios dos valores da velocidade do vento para a formulação do modelo de microescala seleccionada e do modelo de mesoescala. No topo de cada figura apresenta-se o valor do RMSE de cada aproximação.

### 6.3. Análise dos resultados para a técnica de *nesting* usando condições iniciais e fronteira do modelo de mesoescala

A Figura 6-40 apresenta os diagramas de caixa e bigodes da velocidade do vento, e suas componentes  $u$  e  $v$ , respetivamente. Relativamente à intensidade da velocidade do vento infere-se: *i*) a mediana é superior a zero; *ii*) elevada amplitude interquartil, salientando-se que o quartil 25 é superior a 0 m/s; *iii*) elevada magnitude do limite superior; *iv*) ausência de *outliers* de subestimação; *v*) elevado número e magnitude dos *outliers* de sobrestimação. Desta forma, de acordo com os pontos anteriormente identificados é possível concluir que a técnica de acoplamento/*coupling* tende a sobrestimar largamente a intensidade do vento.

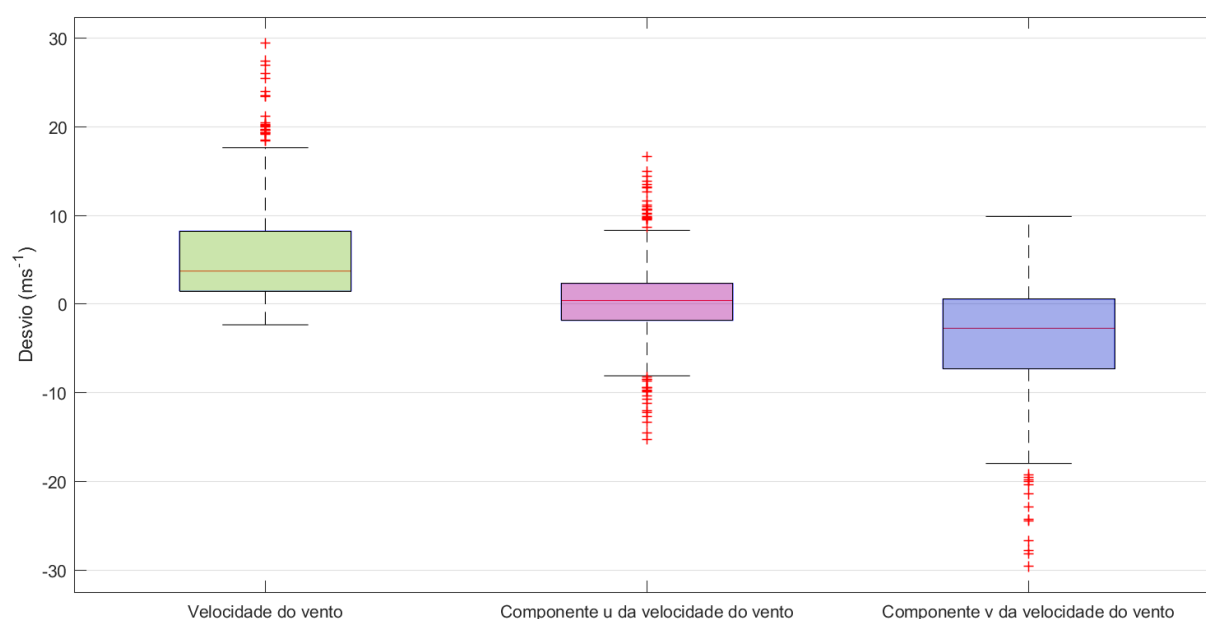


Figura 6-40: Diagrama de caixa e bigodes dos desvios dos valores da velocidade e componentes do vento da técnica de acoplamento.

Na Figura 6-40, analisando o viés da componente  $u$  da velocidade do vento observa-se que: *i*) a mediana é próxima de 0 m/s; *ii*) elevada amplitude interquartil; *iii*) limites superior/inferior de elevada magnitude. De acordo com os pontos antes identificados, e, observando que os quartis (25 e 75) e os limites são aproximadamente simétricos relativamente à origem, a técnica de acoplamento tende a sobrestimar e subestimar a presente componente do vento com a mesma magnitude.

Relativamente à componente  $v$  da velocidade do vento, infere-se que os resultados seguem no sentido inverso da velocidade do vento. Isto porque, observa-se: *i*) mediana inferior a zero; *ii*) limites superior/inferior de elevada magnitude; *iii*) inexistência de *outliers* de sobrestimação; *iv*) elevado número e magnitude dos *outliers* de subestimação. Desta forma, é possível concluir que a técnica de acoplamento tende a subestimar a componente  $v$  do vento.

- Envoltória convexa

A Figura 6-41 demonstra as envoltórias convexas que permitem a comparação dos conjuntos/domínios da técnica de acoplamento, com a técnica de séries virtuais (k-o/30/DM) e com dados reais. Através desta comparação, é possível inferir que a técnica de acoplamento tende a sobrestimar as magnitudes das componentes do vento.

Relativamente à comparação entre as técnicas de acoplamento e das séries virtuais, infere-se que a metodologia de séries virtuais possui um domínio muito mais aproximado do domínio dos dados reais. Incluindo no 1º quadrante, em que apesar do comportamento idêntico entre técnicas, a técnica das séries virtuais consegue captar com desempenho superior o domínio dos reais.

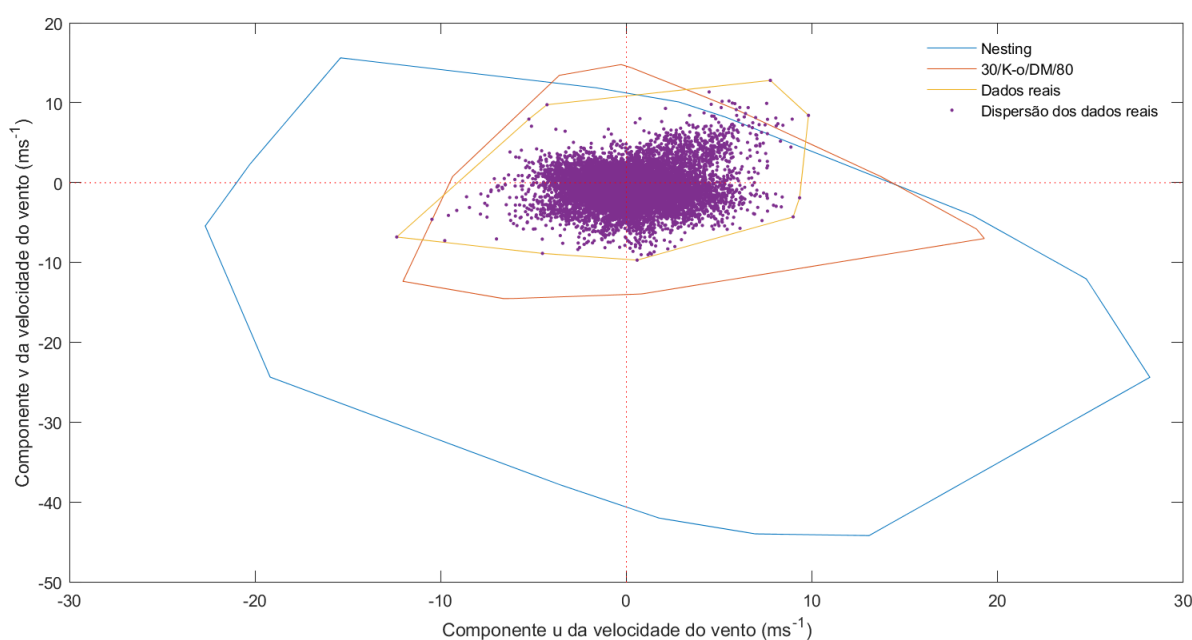


Figura 6-41: Envoltória convexa da técnica usando os dados reais e as diferentes configurações testadas.

- Análise detalhada dos resultados – séries temporais

No sentido de comparar detalhadamente os resultados entre as técnicas (acoplamento e séries virtuais) e outro modelo de diferente conceção, apresenta-se a Figura 6-42 - perfis horários da velocidade do vento: i) real; ii) acoplamento; iii) 30/K-o/DM; iv) mesoescala. Os perfis apresentados permitem deduzir que a técnica/modelo com maior aproximação do perfil real é das séries virtuais. Salientando-se a elevada sobrestimação por vários períodos da velocidade do vento pela técnica de acoplamento.

Inclusivamente, como identificado na Figura 6-36, comparando-se o perfil da configuração 30/K-o/DM com o do modelo de mesoescala, este apresenta um perfil com mais semelhança ao perfil real, excetuando nos períodos contidos entre as 50-75 e 475-500 horas.

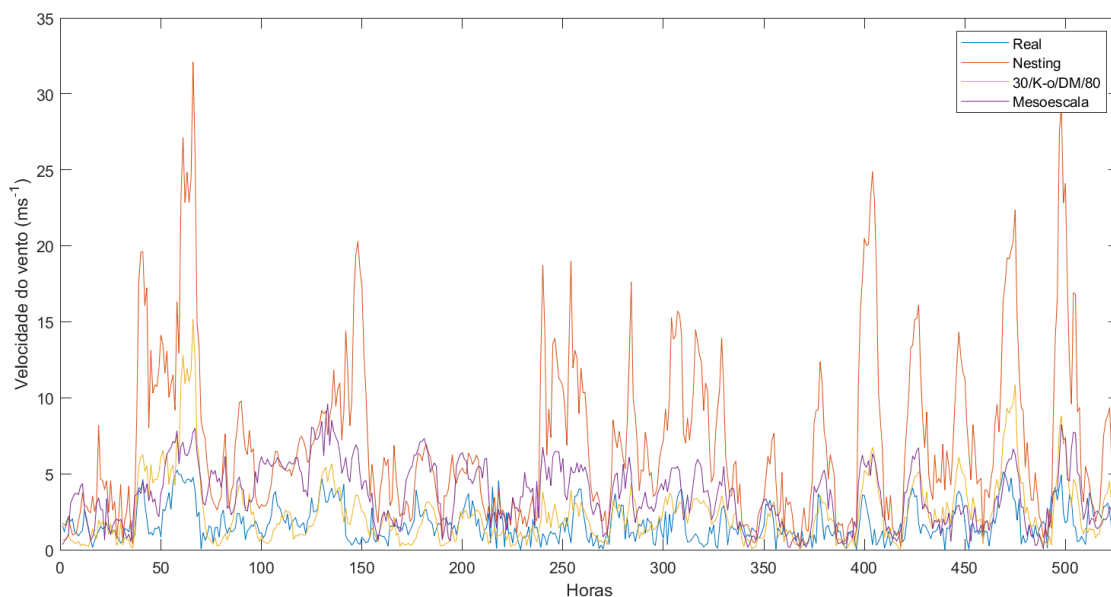


Figura 6-42: Perfis (real, acoplamento, 30/K-o/DM (séries virtuais), mesoescala) de velocidade do vento da estação anemométrica TNW 7 no horizonte temporal 16/05/2017 a 06/06/2017.

### 6.3.1. Síntese resultados – acoplamento

Neste ponto da avaliação dos resultados é possível concluir que os resultados sugerem que a técnica de acoplamento demonstra um fraco desempenho, e fora do espectável, na avaliação/simulação do perfil do vento real. Assim, estes resultados sugerem que ao se alimentar o domínio de simulação *WindSim* com condições iniciais e de fronteira a partir de dados de mesoescala induz-se uma sobrestimação significativa do perfil do vento. Este resultado pode ser parcialmente explicado por a introdução de condições de fronteira com perfis do vento com diferentes características de estabilidade atmosféricas, Figura 6-43. Adicionalmente, os valores médios da velocidade do vento são reduzidos no período em análise. Nestas situações, e como reportado em [72], dentro de um campo de mesoescala o vento pode apresentar direções bastante distintas entre si e não existe uma maneira única de classificar corretamente essas horas num dos quatros agrupamentos definidos. Esta situação pode levar a criação de condições iniciais e de fronteira espúrias entre si não permitindo ao modelo CFD a correta simulação.

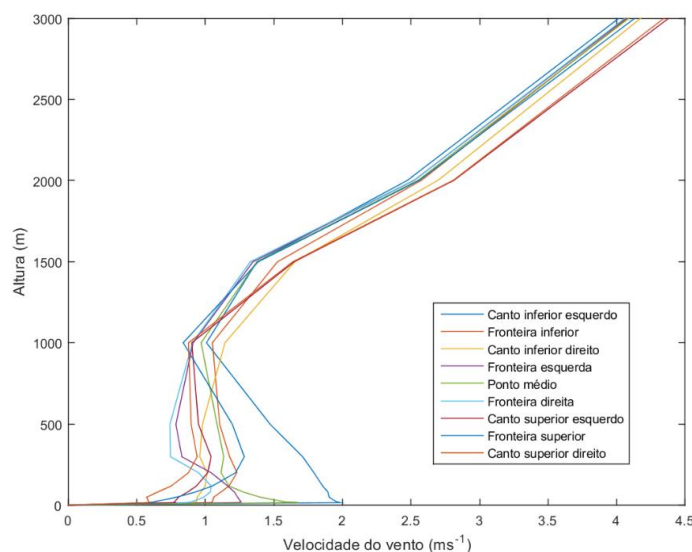


Figura 6-43: Perfis verticais do vento obtidos a partir dos dados de mesoescala, para as fronteiras do domínio de microescala.



Finalmente, através da Figura 6-44 é possível analisar comparativamente o viés e RMSE das técnicas (séries virtuais e com e sem *coupling* dos dados de mesoescala) e do modelo de mesoescala. Através desta figura, é possível inferir que a técnica das séries virtuais sem acoplamento das condições iniciais e fronteira apresenta: i) mediana mais próxima de zero; ii) amplitude interquartil inferior; iii) limites superior/inferior mais próximos de zero; iv) magnitude dos *outliers* semelhante ao modelo de mesoescala. Neste sentido, é possível concluir que a metodologia das séries virtuais demonstra um desempenho superior á técnica de acoplamento e modelo de mesoescala na captação do perfil de vento real, o que é corroborado através valor de RMSE inferior ( $1.5 \text{ m/s}$ ).

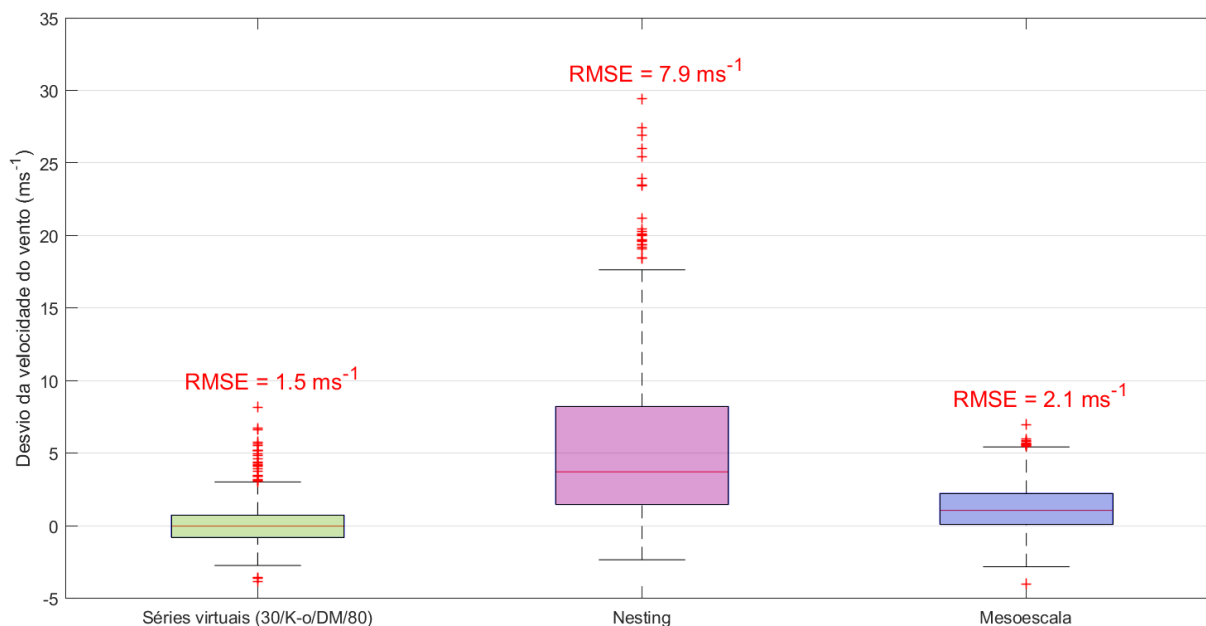


Figura 6-44: RMSE e diagrama de caixa e bigodes dos valores do desvio da velocidade do vento para a técnica de acoplamento, séries virtuais (30/K-o/DM) e modelo de mesoescala.

Salienta-se que a calibração do método de acoplamento se demonstrou bastante difícil e demorada ao nível do desenvolvimento de rotinas que obedecessem exatamente à formatação do ficheiro *xyz*, e da própria simulação em ambiente *WindSim* do módulo *Wind Fields* onde os erros de simulação foram inúmeros e de difícil resolução devido à falta de informação neste sentido. Na literatura existente sobre este assunto foi apenas possível apurar um artigo científico muito recente sobre este tópico [23]. Para a criação das condições fronteira do modelo de mesoescala os autores usaram uma abordagem simplista que passa pela definição de condições de fronteira para cada direção do vento. Esta abordagem é similar ao processo usado por definição no *WindSim*. Assim, este trabalho contribui igualmente para a literatura atual apresentando uma abordagem baseado numa técnica estatística de agrupamentos para definir as condições iniciais e de fronteira



## Capítulo 7 – Conclusões e desenvolvimentos futuros

A análise da capacidade dinâmica de linhas, usualmente designada por DLR, é utilizada para avaliar a capacidade instantânea de linhas aéreas em sistemas eléctricos de energia. Embora os benefícios resultantes da aplicação desta técnica variem com o local, devido à correlação com as condições meteorológicas, a análise DLR pode facilitar uma integração otimizada e económica de energias renováveis, podendo aliviar potenciais problemas de congestionamento particularmente relevante em sistemas eléctricos de energia com elevados níveis de potência eólica instalada, como acontece no caso Português. Com a descarbonização prevista dos sistemas electroprodutores, estes problemas atuais têm tendência a agravar-se devido ao aumento da geração renovável (eólica e solar fotovoltaica) descentralizada.

A análise DLR pode ser aplicada com base em *i*) medições diretas nos condutores da linha eléctrica – abordagem direta, ou *ii*) parâmetros meteorológicos externos que influenciam as condições térmicas dos condutores – abordagem indireta. A presente dissertação centra-se na abordagem indireta, nomeadamente, no desenvolvimento, calibração e avaliação de uma metodologia de acoplamento entre os resultados do modelo de mesoescala (MM5) e o modelo de microescala (*WindSim*) para a caracterização do escoamento atmosférico permitindo alimentar com a máxima precisão possível uma ferramenta operacional de DLR.

Nesta dissertação, é analisado um caso de estudo constituído por duas linhas aéreas (LA) idealizadas com base em 27 estações anemométricas com disposições geográficas coincidentes com os vãos das linhas. Estes dados considerados resultam da experiência na Serra do Perdigão desenvolvida no âmbito de um projeto europeu. A calibração do modelo de microescala é realizada através da avaliação do impacto da resolução da malha de simulação (10, 15 e 30 metros), modelo de turbulência (*K-e*, *RNG* e *K-o*) na caracterização do escoamento atmosférico e séries virtuais que visam a introdução de séries de dados (velocidade e direção do vento) derivadas de um modelo de mesoescala para um determinado local, tendo-se realizado uma análise da dependência da escolha dos pontos de entrada no plano horizontal e vertical. Após identificação da configuração mais adequada, esta foi comparada com uma abordagem baseada no aninhamento (*nesting*) de dados de mesoescala que permite a introdução de condições de fronteira e iniciais no domínio de microescala (componentes da velocidade do vento e temperatura ambiente) derivadas do modelo de mesoescala.

Através do caso de estudo apresentado é possível concluir que a sua dependência dos pontos de entrada no plano *xy* é elevada. Entre as opções de entrada analisadas (DM – localização da diferença mínima entre a cota da orografia do modelo de mesoescala e *WindSim*, PM – Ponto médio do domínio e LA – Pontos coincidentes com os vãos da linha eléctrica aérea) a que apresenta desempenho superior é o método da diferença mínima (DM), o que é espectável pois minimiza a diferença da cota do terreno entre o ponto de extração dos dados de mesoescala e o ponto de introdução das séries virtuais no modelo *WindSim*. Desta forma, sugere-se a consideração deste método em aplicações de caracterização do escoamento atmosférico para aplicações de DLR.

Considerando o método DM para introdução de séries virtuais no plano *xy*, através dos resultados é possível concluir que o modelo de turbulência *K-o model of Wilcox* (*K-o*) tende a reduzir a sobrestimação do escoamento simulado, que, em conjunto com as resoluções de malha com 10 e 30 metros apresentam os melhores resultados tanto a nível da caracterização da intensidade do vento como nas suas componentes.

Relativamente à dependência das séries virtuais no plano vertical é possível concluir que entre as alturas avaliadas (31.9, 80 e 598 metros) a de 80 metros que apresenta melhor desempenho no caso de estudo analisado, pois aproxima-se mais dos resultados do perfil de vento real. Assim, os resultados sugerem

que alimentar o modelo *WindSim* com séries virtuais para alturas próximas do solo (32 metros) ou muito afastadas do mesmo (598 metros) pode não corresponder à melhor opção para obtenção das estimativas da intensidade e direcção do vento. Analogamente através da análise desta dependência (plano  $z$ ) conclui-se que a resolução espacial da malha do terreno de 30 metros apresenta melhores resultados evidenciados pelos valores inferiores do RMSE para a velocidade e componentes do vento.

Em suma, a configuração do modelo para o acoplamento através de séries virtuais com melhores resultados possui as seguintes características – 30/K-o/DM/80. Neste sentido para aplicações idênticas a esta sugere-se a configuração anterior. Contudo, salienta-se a permanência da tendência da metodologia em sobrestimar dos resultados, evidenciada nos valores do RMSE da intensidade do vento de ( $1.5\text{ ms}^{-1}$ ) e das componentes  $u$  e  $v$  ( $1.4\text{ ms}^{-1}$  e  $1.5\text{ ms}^{-1}$ ) superiores a  $0\text{ ms}^{-1}$ .

Em relação à metodologia de acoplamento por *nesting* é possível concluir que os resultados sugerem que esta técnica de acoplamento demonstra um fraco desempenho, e fora do espectável, na simulação do perfil do vento real. Esta conclusão é corroborada pelo elevado valor de RMSE de  $7.9\text{ ms}^{-1}$  e um viés médio superior a  $0\text{ ms}^{-1}$ , ambos relativamente à intensidade do vento.

Através da comparação entre as metodologias avaliadas conclui-se que o acoplamento descartando o uso das condições iniciais e fronteira do modelo de mesoescala apresenta melhor desempenho. Esta metodologia apresenta um menor RMSE da intensidade do vento face ao modelo de mesoescala ( $2.1\text{ ms}^{-1}$ ) realçando o valor da abordagem de acoplamento mesoescala/microescala para aumentar a precisão das estimativas do escoamento atmosférico.

Pese embora os bons indicadores obtidos nesta dissertação, com base num horizonte temporal e área geográfica reduzida, estes carecem de validação usando horizontes temporais superiores e zonas geográficas maiores e com características orográficas diferentes. De forma a aprofundar esta temática, trabalhos futuros deveriam: *i*) analisar o impacto dos níveis e perfis de turbulência dos dados do modelo de mesoescala implementando rotinas de filtração de dados; *ii*) analisar a dependência no plano  $xy$  e  $z$  dos pontos de entrada das condições iniciais e de fronteira na metodologia de *nesting*; *iii*) utilizar resultados de outros modelos de mesoescala; e *iv*) avaliar diferentes formas/metodologias para estabelecer os cenários das condições iniciais e de fronteira.

As conclusões deste trabalho permitem contribuir para o aumento da precisão da avaliação da velocidade e direcção do vento junto dos vãos da rede eléctrica de transporte/distribuição sem recorrer a uma rede de equipamentos extensa e onerosa. O trabalho desenvolvido pode igualmente contribuir para uma identificação mais rigorosa do potencial de eólico em regiões montanhosas e de complexas orografias. O acoplamento adequado entre os resultados de um modelo de mesoescala e um modelo de microescala através de séries virtuais, permite aumentar a precisão da caracterização dos padrões do escoamento atmosférico, importante para o planeamento e operação da rede de distribuição/transporte com ferramentas operacionais de DLR.

## Referências Bibliográficas

- [1] S. Sawyer *et al.*, «Global wind energy council report 2018», *GWEC*, n. April, pp. 1–61, 2019.
- [2] British Petroleum, «BP statistical review of world energy 2017 - 66th edition», 2015.
- [3] J. G. Gomes e S. Serôdio, «Wind Energy Sector Portugal Overview», em *Associação Portuguesa de Energias Renováveis*, 2015, pp. 1–3.
- [4] J. M. H. da Silva, «Avaliação do efeito de interferência de obstáculos no escoamento atmosférico sobre o mar: caso de estudo da ilha Berlenga», Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, 2013.
- [5] Direcção Nacional de Energia e Geologia, «Linhas de atuação para o horizonte 2030 - PNEC 2030», em *PNEC 2030*, 2019, pp. 11–17.
- [6] Agência Portuguesa do Ambiente e Fundo Ambiente, «Roteiro para a neutralidade carbónica 2050», 2019.
- [7] A. Abolude e W. Zhou, «Assessment and Performance Evaluation of a Wind Turbine Power Output», *Energies*, vol. 11, n. 8, p. 1992, Ago. 2018.
- [8] A. I. L. Estanqueiro, «Modelação dinâmica de parques eólicos», Universidade Técnica de Lisboa, 1997.
- [9] J. Duque, D. Santos, A. Couto, e A. Estanqueiro, «Optimal management of power networks using a dynamic line rating approach», *Renew. Energy Power Qual. J.*, vol. 1, n. 16, pp. 584–589, Abr. 2018.
- [10] D. M. Greenwood, «Quantifying the benefits and risks of real-time thermal ratings in electrical networks», Newcastle University, 2014.
- [11] D. L. Alvarez, F. F. da Silva, E. E. Mombello, C. L. Bak, e J. A. Rosero, «Conductor temperature estimation and prediction at thermal transient state in dynamic line rating application», *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 33, n. 5, pp. 2236–2245, Out. 2018.
- [12] B. W. Yan e Q. S. Li, «Coupled on-site measurement/CFD based approach for high-resolution wind resource assessment over complex terrains», *Energy Convers. Manag.*, vol. 117, pp. 351–366, Jun. 2016.
- [13] S. Uski, «Estimation method for dynamic line rating potential and economic benefits», *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 65, pp. 76–82, Fev. 2015.
- [14] S. E. Haupt, Y. Feng, B. Kosovic, e W. J. Shaw, «First year report of the A2e mesoscale to microscale coupling», 2015.
- [15] T. Ringelband, M. Lange, M. Dietrich, e H.-J. Haubrich, «Potential of improved wind integration by dynamic thermal rating of overhead lines», em *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, 2009, pp. 1–5.
- [16] H. J. S. Fernando *et al.*, «The Perdígão: peering into microscale details of mountain winds», *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 100, n. 5, pp. 799–819, Mai. 2019.
- [17] T. L. A. Soares, «Sistemas de produção de electricidade descentralizada baseados em energia renovável», Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.
- [18] R. Costa e J. Conceição, «Redes energéticas nacionais», em *Apresentação à Comissão Parlamentar de Economia*, 2016, p. 28.
- [19] A. Michiorri *et al.*, «Forecasting for dynamic line rating», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 1713–1730, Dez. 2015.

- [20] E. Fernandez, I. Albizu, M. T. Bedialauneta, A. J. Mazon, e P. T. Leite, «Review of dynamic line rating systems for wind power integration», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 53, pp. 80–92, Jan. 2016.
- [21] IEEE, «IEEE Standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors», *IEEE Std 738-2012 (Revision IEEE Std 738-2006 - Inc. IEEE Std 738-2012 Cor 1-2013)*, pp. 1–72, 2013.
- [22] H. Liao e W. Liu, «Weather-based dynamic line rating of overhead transmission lines over Europe interconnected network», *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 382, n. 5, pp. 1–6, Jul. 2018.
- [23] B. P. Bhattarai *et al.*, «Improvement of transmission line ampacity utilization by weather-based dynamic line rating», *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 33, n. 4, pp. 1853–1863, Ago. 2018.
- [24] P. M. A. Miranda, P. Pinto, C. Barroso, I. Novo, M. J. Lopes, e M. Mendes, *Introdução à meteorologia*. 2013.
- [25] K. W. Ayotte, «Computational modelling for wind energy assessment», *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 96, n. 10–11, pp. 1571–1590, Out. 2008.
- [26] P. Theodoropoulos e N. Deligiorgis, «Windsim cfd model validation in a mixed coastal and mountainous region with complex terrain», *Lab. Istos Renewables*, pp. 1–11, 2009.
- [27] M. Bilal, Y. Birkelund, M. Homola, e M. S. Virk, «Wind over complex terrain – microscale modelling with two types of mesoscale winds at Nygårdsfjell», *Renew. Energy*, vol. 99, pp. 647–653, Dez. 2016.
- [28] C. G. Nunalee, C. Meißner, A. Vignaroli, N. Carolina, e R. Nc, «Downscaling MERRA mesoscale data for the generation microscale wind fields using CFD», em *Spain: Europe's Premier Wind Energy Event*, 2014, p. 1.
- [29] C. Schmitt, C. Meissner, e D. Weir, «Influence Of Thermal Stratification on CFD Simulations», em *Europe's Premier Wind Energy Event*, 2011, p. 145.
- [30] I. Troen e E. Lundtang Petersen, «European wind atlas», 1989.
- [31] C. Meissner e D. Weir, «Utilizing WRF data in CFD models for wind energy assessment», em *EWEA*, 2011, p. 154.
- [32] J. M. Wallace e P. V. Hobbs, *Atmospheric Science An Introductory Survey*, Second Edi. Elsevier, 2006.
- [33] P. A. da S. Costa, «Atlas do potencial eólico para Portugal continental», Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2004.
- [34] M. G. B. de Lacerda, «Impacto da circulação atmosférica nas rampas de produção eólica em Portugal», Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2016.
- [35] I. Encyclopædia Britannica, «The paths of a typical sea breeze (day) and land breeze (night).» [Em linha]. Disponível em: <https://cdn.britannica.com/69/62669-050-FBD897CC/paths-sea-breeze-land.jpg>. [Acedido: 21-Jan-2020].
- [36] A. L. Monteiro, «Atlas do potencial eólico para o arquipélago de Cabo Verde», Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2018.
- [37] R. B. Stull, «An introduction to boundary layer meteorology Roland B. Stull», *La Météorologie*, vol. 8, n. 8, pp. 197–251, Fev. 1994.
- [38] I. Encyclopædia Britannica, «The paths of a typical valley breeze (day) and mountain breeze (night).» [Em linha]. Disponível em: <https://cdn.britannica.com/68/62668-050->

- D58D0750/valley-floor-air-slopes-mountains-breeze-hills.jpg. [Acedido: 09-Jul-2020].
- [39] Pedro Tildes, «Baixa pressão sobre a Península Ibérica», *Geographicae worpress*, 2007. [Em linha]. Disponível em: <https://geographicae.files.wordpress.com/2007/05/iberialow1.jpg>. [Acedido: 08-Jul-2020].
- [40] E. Simiu e D. Yeo, *Wind effects on structures -modern structural design for wind*, Fourth edi. Wiley Blackwell, 2019.
- [41] A. P. Diaz, «Sensing the wind profile Risø», Technical University of Denmark, 2009.
- [42] M. F. P. Lopes, «Aplicação numérica e experimental de métodos de simulação da camada limite atmosférica para o estudo da acção do vento sobre edifícios», Instituto Superior Técnico, 2008.
- [43] R. F. Soares, «Modelagem da Turbulência», Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- [44] B. Blocken, T. Stathopoulos, e J. Carmeliet, «CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems», *Atmos. Environ.*, vol. 41, n. 2, pp. 238–252, Jan. 2007.
- [45] CHAM, «Turbulence Models». [Em linha]. Disponível em: [http://www.cham.co.uk/phoenics/d\\_polis/d\\_lecs/general](http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_lecs/general). [Acedido: 22-Jan-2020].
- [46] CHAM, «Standard k-ε model». [Em linha]. Disponível em: [http://www.cham.co.uk/phoenics/d\\_polis/d\\_enc/turmod/enc\\_t341.htm](http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_enc/turmod/enc_t341.htm). [Acedido: 22-Jan-2020].
- [47] X. Zhang, «CFD simulation of neutral ABL flows», Technical University of Denmark, 2009.
- [48] A. Parente e C. Benocci, «On the RANS simulation of neutral ABL flows», em *The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering*, 2010, vol. May, pp. 23–27.
- [49] CFD Online, «Standard k-epsilon model». [Em linha]. Disponível em: [https://www.cfd-online.com/Wiki/Standard\\_k-epsilon\\_model#Model\\_constants](https://www.cfd-online.com/Wiki/Standard_k-epsilon_model#Model_constants). [Acedido: 09-Jul-2020].
- [50] CHAM, «RNG-derived KE-EP turbulence model». [Em linha]. Disponível em: [http://www.cham.co.uk/phoenics/d\\_polis/d\\_enc/turmod/enc\\_t343.htm](http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_enc/turmod/enc_t343.htm). [Acedido: 09-Jul-2020].
- [51] CFD Online, «RNG k-epsilon model». [Em linha]. Disponível em: [https://www.cfd-online.com/Wiki/RNG\\_k-epsilon\\_model](https://www.cfd-online.com/Wiki/RNG_k-epsilon_model). [Acedido: 22-Jan-2020].
- [52] CHAM, «The Wilcox (1988) k-ω turbulence model». [Em linha]. Disponível em: [http://www.cham.co.uk/phoenics/d\\_polis/d\\_enc/turmod/enc\\_t346.htm](http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_enc/turmod/enc_t346.htm). [Acedido: 09-Jul-2020].
- [53] CHAM, «The Wilcox (2008) revised k-ω turbulence model». [Em linha]. Disponível em: [http://www.cham.co.uk/phoenics/d\\_polis/d\\_enc/turmod/enc\\_t347.htm](http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_enc/turmod/enc_t347.htm). [Acedido: 09-Jul-2020].
- [54] CFD Online, «Wilcox's k-omega model». [Em linha]. Disponível em: [https://www.cfd-online.com/Wiki/Wilcox%27s\\_k-omega\\_model](https://www.cfd-online.com/Wiki/Wilcox%27s_k-omega_model). [Acedido: 09-Jul-2020].
- [55] E. Fernandez, I. Albizu, M. T. Bedialauneta, A. J. Mazon, e P. T. Leite, «Review of dynamic line rating systems for wind power integration», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 53, pp. 80–92, Jan. 2016.
- [56] A. Arroyo *et al.*, «Comparison between IEEE and CIGRE Thermal Behaviour Standards and Measured Temperature on a 132-kV Overhead Power Line», *MDPI*, vol. 8, n. 12, pp. 13660–13671, 2015.
- [57] J. Shi, «Flexible transmission networks for renewables integration», Berkeley University of California, 2018.
- [58] A. W. Abboud *et al.*, «Coupling computational fluid dynamics with the high resolution rapid refresh model for forecasting dynamic line ratings», *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 170, n.

- February, pp. 326–337, Mai. 2019.
- [59] A. Abboud, J. Gentle, T. Mcjunkin, C. Meissner, R. Renwick, e D. Hengst, «Dynamic line ratings and wind farm predictions via coupled computational fluid dynamics and weather data», em *Wind summit 2016*, 2015, p. 322.
  - [60] Jeffrey Robinson, «A simulated comparison of linear and RANS based CFD modeling in regard to critical slope», Uppsala University, 2018.
  - [61] T. Wallbank, «WindSim validations study - CFD validation in complex terrain», WindSim AS., 2008.
  - [62] M. Bilal, Y. Birkelund, M. Homola, e M. S. Virk, «Wind over complex terrain – Microscale modelling with two types of mesoscale winds at Nygårdsfjell», *Renew. Energy*, vol. 99, pp. 647–653, Dez. 2016.
  - [63] C. Meissner, A. R. Gravdahl, e B. Steensen, «Including thermal effects in CFD simulations», em *European Wind Energy Conference and Exhibition*, 2009, p. 1.
  - [64] Y. Liu *et al.*, «Evaluation of the wind resource for a coastal site in Mexico by combining WindSim with WRF», *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 99, n. 4, pp. 308–319, Abr. 2011.
  - [65] C. Meissner, *WindSim Getting Started 7*, 7.<sup>a</sup> ed. WindSim, 2015.
  - [66] B. Efe *et al.*, «72hr forecast of wind power in Manisa, Turkey by using the WRF model coupled to WindSim», em *2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2012, pp. 1–6.
  - [67] U.S. Energy Information Administration, «Today in energy», *Survey EIA-860*, 2017. [Em linha]. Disponível em: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=33912>. [Acedido: 14-Jun-2018].
  - [68] D. J. da S. Carvalho, «Simulação do recurso eólico em Portugal e futura alteração de larga escala devido a alterações climáticas de origem antropogénica», Universidade de Aveiro, 2014.
  - [69] A. Couto, J. Silva, P. Costa, D. Santos, T. Simões, e A. Estanqueiro, «Towards a high-resolution offshore wind Atlas - The Portuguese Case», *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1356, pp. 12–29, Out. 2019.
  - [70] A. Hahmann *et al.*, «The NEWA mesoscale Wind Atlas: production and ensemble runs», em *WindEurope Conference 2019 – NEWA Side Event*, 2019, n. April, pp. 1–27.
  - [71] P. T. L. D. C. Pedrosa, «Avaliação do potencial eólico – validação de uma metodologia espacial multi-estação», Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 2019.
  - [72] P. Durán, C. Meissner, e P. Casso, «A new meso-microscale coupled modelling framework for wind resource assessment: A validation study», *Renew. Energy*, pp. 1–35, Jul. 2020.
  - [73] I. de F. Ferreira, R. Pina, e A. M. e Moura, «Projeto de linhas de alta tensão e estudo do campo electromagnético produzido pela linha.», 2007.
  - [74] WindSim AS., «WindSim History». [Em linha]. Disponível em: <http://windsim.com/about/history.aspx>. [Acedido: 14-Jul-2020].
  - [75] C. Monteiro *et al.*, «Wind power forecasting : state-of-the-art 2009». Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Argonne National Laboratory, pp. 5–28, 2009.
  - [76] CFD Online, «PHOENICS Description», 2013. .
  - [77] B. Rehm, D. Consultant, A. Haghshenas, A. S. Paknejad, e J. Schubert, «Situational Problems in MPD», em *Managed Pressure Drilling*, Elsevier, 2008, pp. 39–80.
  - [78] M. M. Scherer, *Introduction to renormalization with applications in condensed-matter and high-*

- energy physics*. Institute for Theoretical Physics of University of Cologne, 2018.
- [79] S. Staub, E. Karaman, S. Kaya, H. Karapınar, e E. Güven, «Artificial Neural Network and Agility», *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 195, pp. 1477–1485, Jul. 2015.
- [80] T. Kohonen, «Essentials of the self-organizing map», *Neural Networks*, vol. 37, pp. 52–65, Jan. 2013.
- [81] R. C. Daniel e R. J. Vanderbei, «Linear programming: foundations and extensions», *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 49, n. 1, p. 94, 1998.

## Anexo I – Definição da localização de diferença mínima entre o terreno do modelo MM5 e *WindSim*

De forma a completar a análise do ponto de diferença mínima (DM) da cota de terreno dos ficheiros analisados em cada modelo, neste anexo apresentam-se algumas figuras adicionais. Estas figuras permitem avaliar os diferentes ficheiros utilizados na análise da diferença entre as cotas dos terrenos dos modelos de mesoescala, Figura I- 1, e microescala, Figura I- 2. A análise foi realizada através do recurso do *software* Surfer que permite a realização da subtração ponto a ponto entre ambas as malhas.

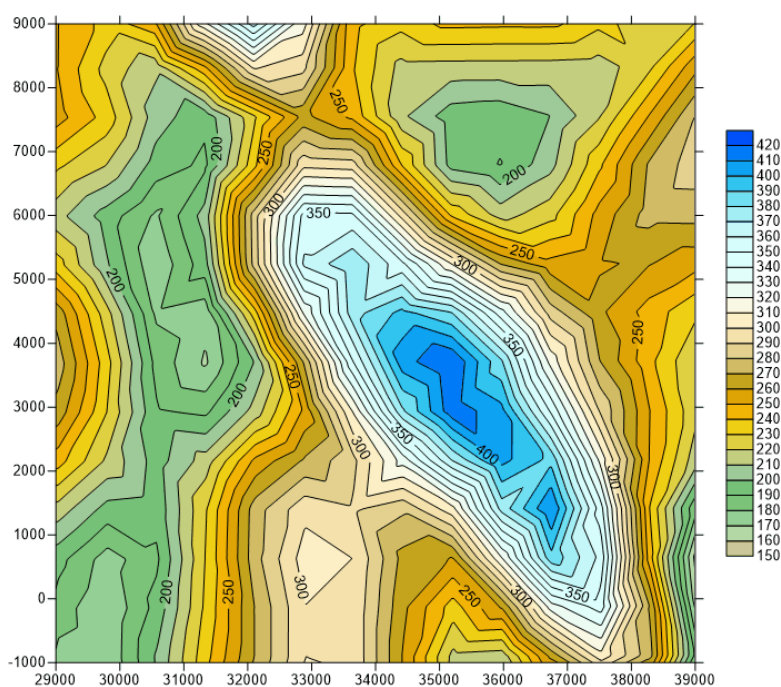


Figura I- 1: Malha e cotas em metros do modelo de mesoescala em ambiente Surfer.

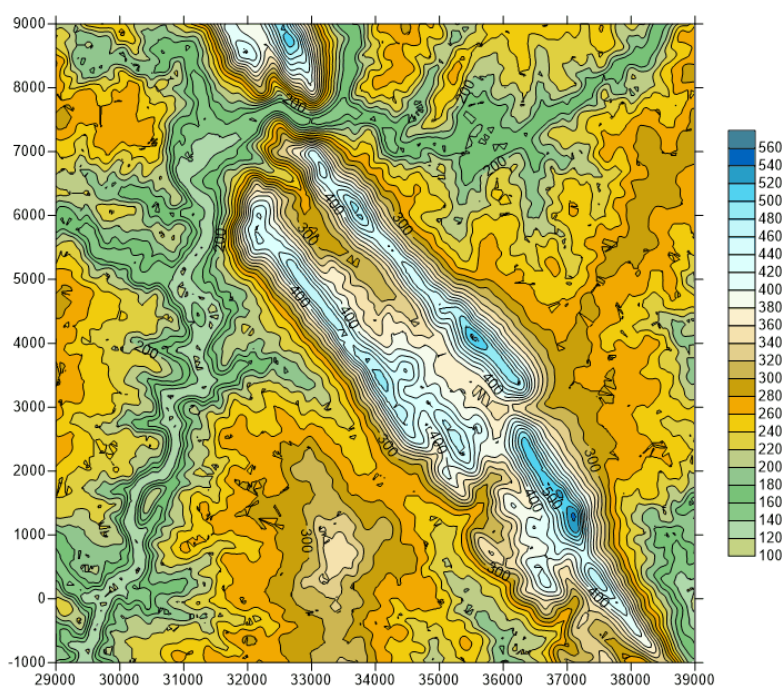


Figura I- 2: Malha e cotas em metros do modelo microescala em ambiente Surfer.



Através da sobreposição dos dois mapas, e a subtração das cotas ponto a ponto obtêm-se o ficheiro *grd* com as respectivas diferenças. Finalmente através da identificação do valor mínimo é possível identificar a localização geográfica em que ambos os mapas possuem maior aproximação de cotas.

No sentido de conceder uma melhor percepção tridimensional da zona de simulação, apresenta-se a Figura I- 3 sendo possível perceber a orografia com as duas colinas quase paralelas.

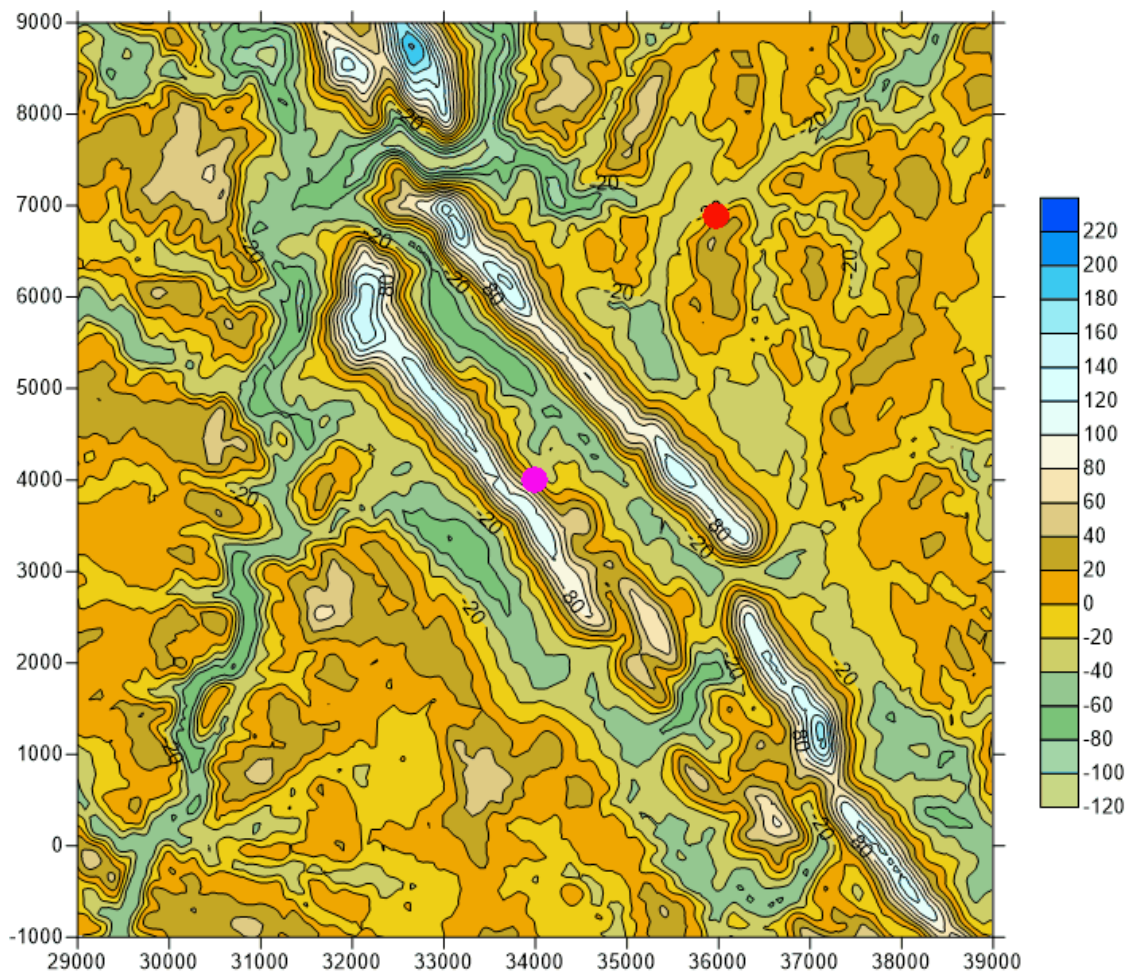


Figura I- 3: Subtração entre as cotas, em metros, das malhas de microescala e mesoescala em ambiente Surfer. Indicação do ponto DM – ponto vermelho e do ponto PM – ponto rosa.

## Anexo II – Design de linhas aéreas

O fator limitativo da capacidade de transmissão de linhas aéreas encontra-se relacionado com a necessidade de manter uma distância de segurança entre o condutor e os obstáculos no terreno. Desta forma, a análise DLR é baseada no limite máximo de temperatura de condutor para o qual a sua dilatação respeita a distância de segurança e integridade mecânica dos materiais [11], [19]. A temperatura do condutor é dependente da carga eléctrica, contudo, é também influenciada pelas condições ambientais como a direção/velocidade do vento, temperatura ambiente e radiação solar incidente. Esta variação de temperatura do condutor induz a dilatação do condutor, modificando a dimensão da flecha<sup>n</sup> dependendo da i) tensão mecânica e ii) da dimensão do vão [73].

Num caso ideal, ou seja, assumindo o condutor um fio suficientemente flexível e não elástico estendido entre dois pontos distanciados entre si e elevados de modo a que não exista contacto com o solo, o mesmo adquire a forma característica denominada por catenária. Para um caso ideal, em que os condutores se encontram em equilíbrio e não existe influência de agentes externos sobre os condutores, o modelo matemático que descreve a catenária é o seguinte [73]

$$y = k \left( \cosh \frac{x}{k} \right) \quad (\text{II.1})$$

onde o parâmetro da catenária,  $k = T_o/p$ , em que  $T_o$  é a componente horizontal da tensão e  $p$  o peso por unidade de comprimento,  $x$  é a distância, em metros, medida em projeção horizontal entre o ponto em que a tangente à curva é horizontal e um ponto qualquer na curva catenária, e  $y$  é a distância, em metros, medida em projeção vertical entre o ponto em que a tangente à curva é horizontal e um ponto qualquer na curva catenária.

Contudo, num caso para um caso não ideal, a forma da linha eléctrica aérea pode ser aproximada através da seguinte aproximação de uma catenária [19]:

$$S = \frac{mgL^2}{8H} \quad (\text{II.2})$$

onde  $m$  é a massa do condutor por unidade de comprimento,  $g$  a aceleração da gravidade,  $L$  o comprimento do vão e  $H$  a força de tensão do condutor, que por sua vez depende do equilíbrio térmico do mesmo:

$$A(T_{c2} - T_{c1}) + \frac{B}{H_1^2} - H_1 = \frac{B}{H_2^2} - H_2 \quad (\text{II.3})$$

onde  $A$  e  $B$  são parâmetros que dependem das propriedades do condutor como o coeficiente de elongação térmica, Young's módulo, área de secção, massa do condutor e comprimento do vão.  $T_c$  é a temperatura do condutor e  $H$  é a componente horizontal da força de tensão com os índices 1 e 2 referentes a dois estados diferentes, ou seja, 1 o estado *standard* das condições do condutor e 2, que varia com a temperatura.

---

<sup>n</sup> "Distância entre o ponto do condutor onde a tangente é paralela à reta que passa pelos pontos de fixação e a interseção da vertical que passa por esse ponto com esta reta, supondo que o condutor não é desviado pelo vento [73]."

## Anexo III – Descrição do software *WindSim*

O desenvolvimento *WindSim* iniciou-se em 1998, através de uma cooperação entre a *WindSim AS*. e o instituto meteorológico norueguês com intuito inicial de colmatar as dificuldades de simulação e avaliação do escoamento eólico sobre a complexa costa norueguesa. Sendo desenvolvida a metodologia aplicada posteriormente no *software* comercial *WindSim*.

No ano de 2003, após vários desenvolvimentos foi lançada a primeira versão comercial do *software*. Sendo que, com o seu lançamento se observou um contínuo desenvolvimento do programa culminando numa vasta utilização por parte da comunidade eólica como a Vestas, GE Energy, Gamesa, Enercon, Senvion, Suzlon, Siemens, Nordex, etc.

Sendo um modelo pioneiro na aplicação da tecnologia de CFD para a otimização de parques eólicos, o *WindSim* possibilitou a indústria eólica suplantar variadas dificuldades inerentes ao desenvolvimento de parque eólicos não só através da aplicação da tecnologia de CFD, mas também de novas metodologias como é o caso do *coupling* [74].

### III.1. Fundamentos

O *software* comercial *WindSim* recorre à resolução das equações de *Reynolds*. Ou seja, as equações são deduzidas a partir das equações de *Navier-Stokes* usando um procedimento de médias temporais [61]. Contrariamente a uma abordagem por etapas, a simulação do escoamento inicia-se através de condições de fronteira impostas pelo utilizador, e aplicando um modelo de turbulência, as equações são solucionadas através de um processo iterativo até a solução convergir para um critério de convergência também imposto pelo utilizador.

As equações de Navier-Stokes definidas na metodologia do *WindSim* são expressas na forma de tensor cartesiano [61].

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{II.4})$$

$$U_j \frac{\partial U_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - (\overline{u_i u_j}) \right) \quad (\text{II.5})$$

onde  $U$  é a velocidade,  $x$  a componente de posição,  $P$  a pressão atmosférica,  $\rho$  a densidade,  $\nu$  a viscosidade cinemática e os subscritos  $i$  e  $j$  são vetores unitários.

Note-se que a turbulência é obtida relacionando a número de *stress* de *Reynolds* com a velocidade média através da viscosidade turbulenta [61].

$$\overline{u_i u_j} = \nu_T \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \delta_{ij} k \quad (\text{II.6})$$

onde  $\nu_T$  é a viscosidade turbulenta e  $k$  é a energia cinética turbulenta.

Para a resolução iterativa das RANS o *WindSim* recorre ao algoritmo denominado de PHOENICS [75]. Este código é aplicável a fluxos turbulentos ou laminares, multi-fases, compressíveis ou incompressíveis, estáveis ou instáveis, em duas ou três dimensões usando coordenadas cartesianas,

cilíndricas ou curvilíneas. Sendo capaz de proceder a integrações espaciais de modo a conseguir lidar com escoamentos parabólicos, hiperbólicos ou escoamentos em zonas de recirculação [76].

## III.2. Estrutura modular

O presente *software* recorre a uma estrutura modular, nomeadamente, seis módulos. Os primeiros três módulos apenas correm se o módulo anterior for corretamente simulado. Os restantes três correm independentemente entre si, mas com a condição dos três módulos iniciais serem todos simulados. Nos próximos subcapítulos é realizada uma descrição sumária de cada módulo, assim como das suas propriedades.

### III.2.1. *Terrain*

O módulo *Terrain* é o primeiro módulo, sendo onde é importado o ficheiro referente à elevação do terreno e a rugosidade da área de simulação. Através do mesmo, o *WindSim* desenvolve um modelo em três dimensões do volume de análise, tendo por base o ficheiro inicialmente carregado que necessita de possuir o formato *gws*.

O *software WindSim* contém uma ferramenta de conversão de formatos de ficheiros da área de análise. Nesta ferramenta é possível a conversão para o formato *gws* de formatos de *softwares* terciários como o Wasp (.map), Surfer (.grd), Esri shapefile (.shp) ou geometria xyz (.xyz). Esta ferramenta mostrou-se bastante útil para a presente dissertação pois permitiu a conversão do formato *map* existente de trabalhos anteriores do LNEG no caso de estudo em análise.

No presente módulo é possível várias manipulações dos dados de entrada através da definição das propriedades da simulação. Na seguinte análise das propriedades apenas se incorre numa análise detalhada das propriedades que possuem maior preponderância na presente dissertação.

- *Terrain extension*: define a extensão da área de análise, permitindo ser igual ou inferior às dimensões máximas do ficheiro original do terreno em formato *gws*. Note-se que relativamente ao sistema de coordenadas, estas podem ser definidas em qualquer sistema ortogonal. Contudo, após a simulação do modelo em três dimensões o sistema de coordenadas locais é introduzido com origem no canto inferior esquerdo.
- *Roughness*: por definição a rugosidade é definida através da informação contida no ficheiro *gws*. Em alternativa pode ser modelada através da definição de um valor diferente de zero para a rugosidade base, que em conjunto com a seguinte lei logarítmica calcula os restantes valores.

$$\frac{U}{U_T} = \frac{1}{k \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (\text{II.7})$$

onde  $U$  corresponde à velocidade do vento,  $U_T$  à velocidade de fricção  $(T_0/\rho)^{0.5}$ ,  $T_0$  à a tensão de cisalhamento,  $\rho$  à densidade do ar,  $k$  é a constante de Von Karman,  $z$  a coordenada na direcção vertical e  $z_0$  a rugosidade base.

- *Refinement type*: durante a modelação do modelo numérico por definição não é aplicado nenhum tipo de refinamento à orografia do terreno. Porém é possível a aplicação de um que por defeito possui 1/3 da área total do domínio e é colocado no centro do mesmo. No interior da área de refinamento a distribuição de células é uniforme, fora do mesmo as células aumentam de dimensão na direcção das fronteiras do domínio. O aumento de dimensão das células é imposto

através de um rácio aditivo ao tamanho da resolução, ou seja, uma expansão aritmética em que é adicionado um valor especificado pelo utilizador,  $\delta$ , à célula anterior de modo a obter a dimensão da célula seguinte.

- *Height above terrain*: define a distância vertical entre o ponto de maior elevação do modelo em três dimensões e a fronteira superior. De modo a se definir um valor correto para esta altura é necessário contrabalançar as seguintes premissas: *i*) a malha na direção vertical deve ser a mais densa possível, especialmente junto da superfície; *ii*) a fronteira superior, se definida muito próxima do solo, induz efeitos de bloqueamento do escoamento, especialmente quando o mesmo flui sobre montanhas ou outros tipos de elevações.  
Como o critério utilizado deriva de experiências anteriores, define-se que a fração das áreas máxima e mínima correndo o modelo na direção Oeste-Este e Sul-Norte deve ser superior a 0.95.
- *Horizontal gridding*: Esta propriedade pode ser definida como o número máximo de células, ou seja, o modelo consiste em  $n_x * n_y * n_z$  células e este valor pode ser definido pelo utilizador. Note-se que no caso de ser imposto uma área de refinamento o número máximo de células é calculado através de uma interpolação.  
A presente propriedade pode também ser definida, caso se recorra a uma área de refinamento, através da *Horizontal Resolution*. Neste caso a malha é construída através do número de células na direção vertical, da resolução horizontal da área de refinamento e da razão de expansão da malha nas zonas exteriores da área de refinamento.
- *Height distribution factor*: a distribuição dos cálculos na direção vertical segue uma sequência aritmética. Sendo que esta propriedade define a fração entre o cálculo do nível vertical mais próximo da superfície e o mais próximo da fronteira superior.
- *Number of cells in z direction*: esta propriedade define o número de células na direção vertical.
- *Orthogonalize 3D grid*: técnica utilizada para melhorar a convergência em casos com elevados declives do terreno. Ao se formar a malha ortogonal, esta estende-se na direção vertical de acordo com as linhas do terreno. Desta forma, as células são “achataadas” em zonas de grande inclinação, potenciando a convergência.
- *Smoothing type*: nesta propriedade estão definidos dois tipos de suavização para casos em que a simulação do módulo seguinte não converge.  
Os casos de divergência usualmente devem-se a variações bruscas do terreno - características de zonas de vales ou picos montanhosos. Sendo que, estas zonas não são de interesse para a exploração eólica a sua ligeira modificação é aceitável. No entanto, uma excessiva modificação do terreno – elevados valores de suavização do terreno - não é aconselhável pois modifica drasticamente as características do mesmo. Existem duas possibilidades de suavização do terreno, *i*) Bi-linear e *ii*) Gaussian. No primeiro modelo a suavização do terreno é realizada percorrendo as coordenadas x e y aplicando a suavização do terreno até um valor máximo. No segundo modelo de suavização, a mesma é realizada através de uma ponderação gaussiana dos valores vizinhos. Na maioria dos casos este modelo induz uma suavização mais acentuada que o primeiro.
- *Terrain smoothing limit*: em termos matemáticos as alterações da inclinação da morfologia do terreno são avaliadas pela segunda derivada da elevação. Desta forma, com esta parametrização do modelo é possível definir que todos os locais em que o valor da segunda derivada da elevação seja superior a um determinado valor, estes são suavizados através de processos iterativos.

- *Smoothing radius*: nesta propriedade é possível definir a área em que a suavização é aplicável. Esta área define-se como um círculo no centro da área de análise e com uma dimensão máxima de 1, abrangendo os cantos do domínio da simulação.
- *Gradual Smoothing type*: o tipo de suavização pode ser definido como gradual, ou seja, impor uma suavização no interior ou no exterior do domínio de suavização, impondo que está seja contínua no restante domínio. Note que, aplicando a suavização de forma interior, a mesma é imposta desde o centro até ao limite de suavização, caso a suavização seja aplicada de forma exterior, a mesma é imposta desde o limite de suavização até ao limite do domínio. Em ambos casos no restante domínio a suavização é definida de modo constante.

### III.2.2. Wind Fields

O presente módulo recorre ao modelo em três dimensões construído no módulo anterior, resolvendo as equações RANS através de um modelo de turbulência. Sendo que as equações não são lineares, para a sua resolução recorre-se a um processo iterativo que se inicia através da definição das condições iniciais e culmina com a convergência da solução.

No processo antes descrito são determinados para todos os setores e pontos da malha as seguintes variáveis:

- Pressão ( $P_1$ )
- Vetor da velocidade ( $U_1, V_1, W_1$ )
- Energia cinética turbulenta ( $K_E$ )
- Taxa de dissipação da turbulência ( $EP$ )

Relativamente às condições de fronteira e iniciais estas podem ser definidas através de perfis analíticos ou por *nesting* (de uma simulação anterior do *WindSim* com menor resolução ou com dados de um modelo mesoescala).

Os perfis analíticos possuem um carácter empírico, sendo dependentes da rugosidade e da estabilidade da atmosfera. No caso de se considerar uma atmosfera neutra os perfis do vento são logarítmicos, o que é equivalente a assumir-se um terreno plano infinito como fronteira do domínio do modelo simulado. Desta forma, os resultados junto das fronteiras devem ser tratados com cuidado.

Relativamente à técnica de *nesting*, esta envolve o recurso aos resultados de um modelo em três dimensões que englobe na totalidade o domínio de simulação, sendo que, as condições de fronteira são interpoladas do domínio do modelo exterior. Nesta técnica o modelo envolvente pode ser de origem de simulações anteriores do *WindSim* ou de modelos externos de mesoescala.

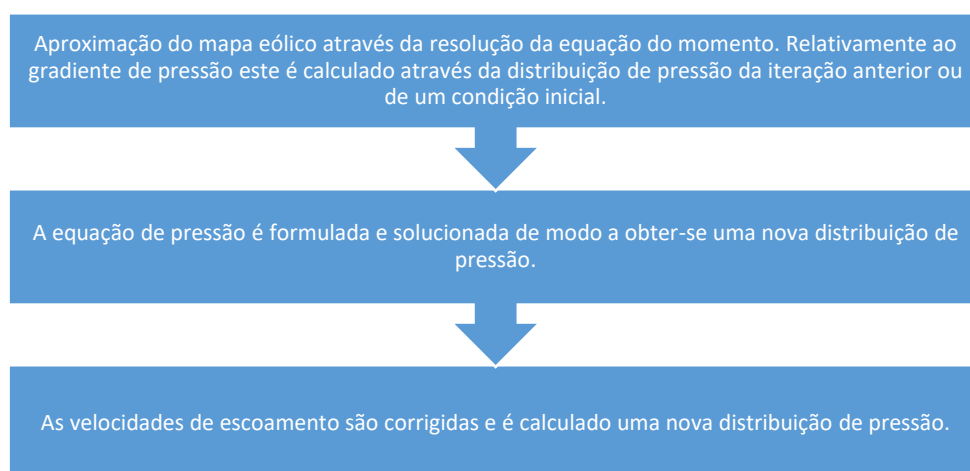
No caso de se recorrer a modelos de mesoescala a informação é interpolada para a malha do modelo simulado no *WindSim* como condições iniciais e de fronteira. Para realizar este acoplamento dos dados do modelo de mesoescala é necessário transformar os dados deste modelo no formato *xyz* e necessita de ser convertida para o formato do *WindSim* (*dws*). Esta conversão pode ser realizada através da ferramenta do *WindSim* denominada por *import mesoscale driving data*. Note-se que através do recurso à técnica de *coupling* não é possível a determinação da produção energética anual, a introdução de áreas de refinamento, e a comparação de dados com climatologias.

No presente módulo dispõe-se das seguintes propriedades para manipulação da simulação do mapa eólico.

- *Do nesting*: esta propriedade permite definir os termos de como irá incorrer a simulação relativamente aos dados de condição inicial e de fronteira, ou seja, se irá ser realizado a técnica de *coupling* e com que dados a mesma irá ser realizada.
- *Sector input type*: define como simular os sectores. Isto é, de modo automático, onde é apenas necessário definir o número máximo de sectores, ou de modo manual, onde é necessário introduzir os direcionais sectores a simular.
- *Height of boundary layer*: define a altura da CLA, sendo que, a baixo desta cota o perfil do vento é considerado logarítmico e acima é considerado constante. A correta definição desta altura é de extrema importância para a precisão e exatidão dos resultados da simulação.
- *Speed of boundary layer*: define a velocidade do vento constante no topo da CLA. Esta propriedade deve ser definida de forma teórica ou com recurso a dados experimentais ou modelados.
- *Use previous run as input*: esta propriedade permite que a solução de uma simulação anterior possa ser usada como condições iniciais e de fronteira. Desta forma, em caso da solução de determinado sector não convergir permite o forçamento do mesmo para uma situação de convergência. Note-se que esta propriedade não está disponível em casos de simulações que englobem o uso da temperatura ambiente ou a técnica de *coupling*.
- *Boundary condition at top*: possibilita a definição da condição de fronteira no topo do domínio de simulação como pressão fixa, ideal para orografias complexas, ou como parede sem fricção, ideal para orografias planas.
- *Potential Temperature*: a ativação da temperatura pode ser realizada de três formas, através da teoria de Monin-Obukov, dos dados de mesoescala ou de um projeto anteriormente simulado.

No caso da teoria de Monin-Obukhov, dependendo do valor do comprimento de Monin-Obukhov os perfis verticais são avaliados para uma determinada estabilidade atmosférica assumindo-se um gradiente linear da temperatura ambiente. Note-se que, para a aplicação desta teoria é necessário a definição das seguintes propriedades: *reference temperature*, *Monin-Obukhov length*, *reference height* e *Wind speed in reference height*.

Finalmente ao iniciar-se a temperatura através de dados de modelos secundários, como modelos de mesoescala, ou de dados de simulações de *WindSim* anteriores os mesmo são interpolados e introduzidos como condições de fronteira e iniciais.
- *Turbulence model*: permite a escolha entre cinco esquemas de turbulência: *standard k-epsilon*, *modified*, *standard k-epsilon with YAP correction*, *RNG k-epsilon* e *k-omega model of Wilcox*.
- *Solver*: esta propriedade possibilita a definição de dois tipos de *solver*. Por defeito este *software* recorre ao algoritmo de Patankar-Spalding, conhecido por SIMPLE (*semi implicit method for pressure linked equations*). Através do algoritmo SIMPLE a análise de um escoamento estável é realizada iterativamente não sendo necessário a resolução total do sistema de equações de pressão e velocidade. Isto porque, as diferenças entre as soluções consecutivas tornam-se desprezáveis. De um modo global e simplista o presente algoritmo possui o seguinte comportamento:



Devido ao elevado número de células e a sua forma não ortogonal característica em simulações com orografias complexas surge a necessidade de recorrer a um *solver* que possua menos dificuldades de convergência, do que o algoritmo SIMPLE, perante estas particularidades das células. Desta forma, na presente propriedade é possível a definição do solver GVC (*general collocated velocity*).

- *Number of iterations*: define o número máximo de iterações do processo de resolução não linear. Para simulações com um número de células superior a 1000000 e recorrendo apenas a um CPU (*Central Processing Unit*) é aconselhado um valor superior a 1000 iterações.
- *Convergence wizard*: em casos em que a convergência é difícil de alcançar, o presente *software* possui esta ferramenta que potencia a convergência. O procedimento por defeito é baseado num falso intervalo de tempo de relaxação, enquanto que, através da ativação desta ferramenta, o intervalo é substituído por uma relaxação linear. Este procedimento aumenta o tempo até à convergência e produz opções conservativas invés de ótimas.
- *Convergence criteria*: termina a simulação quando o nível de convergência imposto na presente propriedade for alcançado. Para este propósito é calculado o somatório de todos os desvios das variáveis analisadas, sendo o mesmo normalizado perante um valor referência. Quando o valor calculado for inferior ao critério de convergência a simulação cessa.
- *Convergence monitoring*: permite a definição da localização do ponto em que a convergência é monitorizada. A definição deste ponto engloba a escolha das coordenadas do ponto, o sistema de coordenadas correspondente e a variável em que convergência é monitorizada.
- *Height of reduce wind database*: armazena os resultados, variáveis do escoamento ou derivadas e auxiliares, numa base de dados comprimida. Desta forma facilita o posterior acesso aos resultados bem como reduz o tempo de simulação.

### III.2.3. Objects

O presente módulo é usado para posicionar turbinas eólicas, séries virtuais. Caso as séries virtuais não possuam o formato do *WindSim* (.tws), é possível recorrer a uma ferramenta de conversão denominada por *Convert climatology data*.

Relativamente às propriedades deste módulo, estas apresentam uma logística diferente dos restantes módulos.



- *Object defenition*: nesta propriedade é possível a definição: 1) nome e tipo do objeto; 2) imagem para visualização; 3) presença do objeto na simulação; 4) ficheiro de dados referente ao objeto adicionado; 5) cota; 6) diâmetro do rotor para o caso de uma turbina; 7) velocidade de rotação do anemómetro; e 8) direção da turbina em relação ao vento, sendo medida na direção horária relativamente ao Norte.
- *Position*: permite definir as coordenadas do objeto, sendo a mesma realizada com referência ao sistema de coordenadas local ou global. O sistema local de coordenadas possui origem no canto inferior esquerdo e o sistema global obedece ao do ficheiro *gws*.
- *Noise Calculation*: permite a definição do cálculo do mapa de nível de som a uma determinada cota, sendo possível considerar o nível de som do ambiente circundante.
- Para a determinação do nível de som é necessário a especificação da velocidade do vento a determinada cota. De acordo com a especificação é realizado o cálculo da velocidade do vento no rotor é transferida para a altura de referência através de uma lei de potência com um expoente de  $1/7$ . O nível de pressão de som  $L_P$  numa posição geométrica numa posição geométrica  $P(x, y)$  produzido por determinada turbina é calculada pela seguinte expressão.

$$L_P(x, y) = L_{W_i} - 10 \log(2\pi d_i^2) - ad_i \quad (\text{II.8})$$

onde  $L_{W_i}$  é a potência de nível de som,  $d_i$  é a distância da posição geométrica à turbina eólica e  $a$  o coeficiente de atenuação de som.

O nível de pressão de som devido às diferentes turbinas eólicas e o nível de pressão de som ambiente,  $L_A$ , são determinados da seguinte forma:

$$L_P(x, y) = 10 \log \left( \sum 10^{0.1L_{P_i}} + 10^{0.1L_A} \right) \quad (\text{II.9})$$

### III.2.4. Results

O presente módulo permite a extração de planos em duas dimensões dos resultados armazenados na base de dados comprimida obtida no módulo do *Wind Fields*. Inclusivamente é também possível a visualização numa animação variável no tempo das variáveis extraídas. A extração das variáveis pode ser realizada com três tipos e normalização: *i*) não normalizadas; *ii*) normalizadas por dados de climatologias; *iii*) normalizadas por um valor escalar.

Relativamente às propriedades do presente módulo têm-se:

- *Planes*: possibilita a definição da cota do plano e os setores a que se pretende realizar a extração dos dados presentes na base de dados comprimida.
- *Legend*: define o valor máximo e mínimo da legenda de resultados. Note-se que por defeito é zero para ambos os parâmetros.

### III.2.5. Wind Resources

Para a simulação deste módulo é necessário a definição de, no mínimo, uma série virtual onde todos os setores estejam representados. Este módulo constrói um mapa do recurso eólico através de uma interpolação com base no inverso da distância dos dados simulados e dos dados presentes nas séries

virtuais. Desta forma, é possível a classificação das áreas simuladas de acordo com a velocidade do vento e a produção energética.

As propriedades do presente módulo dividem-se da seguinte forma.

- *Heights*: define as alturas a simular, sendo que, estas devem ser superiores à cota do terreno e estar contidas na base de dados comprimida.
- *Sector interpolation*: A direção do vento para uma simulação refere-se à direção a jusante do modelo, sendo que, devido aos efeitos orográficos este escoamento é modificado. De modo a comparar a base de dados e as climatologias é necessária efetuar a interpolação para a reprodução dos setores das climatologias na sua posição geográfica.
- *Wake model*: simula analiticamente e através dos resultados do modelo os efeitos de esteira das turbinas eólicas. Os métodos analíticos possuem a vantagem de uma maior simplicidade e menores necessidades computacionais. Os métodos disponibilizados calculam a velocidade normalizada ( $\partial V = (U - V)/U$ ) a partir da altura do vetor por serem métodos assimetricamente rotacionais.  
O déficit de velocidade é calculado com base nos dados simulados, contudo, por serem um processo a interação entre as esteiras e orografia pode não ser corretamente capturada devido a ser um processo posterior à simulação do mapa eólico.
- *Roughness Height*: define a rugosidade da orografia no local das turbinas eólicas. Este valor pode ser definido através do ficheiro gws ou de uma análise realizada pelo utilizador.
- *Ambient turbulent intensity*: define a temperatura ambiente no local da turbina eólica. Esta pode ser definida por dados simulados ou um valor imposto pelo utilizador.
- *Number of sub-sectors*: define o número de setores que cada setor da climatologia é dividido.
- *Influence range*: estipula a zona de influência, sendo a mesma definida em diâmetros do rotor. Desta forma, o valor mínimo é atribuído para negligenciar efeitos de esteira que não sejam corretamente modelados através dos métodos disponíveis.
- *Multiple wakes*: em situações com influência de variadas zonas de efeito de esteira o *software* faculta esta propriedade que combina os diferentes efeitos de esteira num efeito equivalente.
- *Legend*: define o valor máximo e mínimo da legenda dos resultados. Note-se que por defeito é zero para ambos os parâmetros.
- *Export*: possibilita a exportação dos resultados no formato ASCII com os parâmetros relevantes para o setor eólico (e.g., velocidade média anual) no formato WAsP. Note-se que a exportação no formato WAsP necessita de elevados recursos computacionais.
- *Cross checking*: a seguinte propriedade permite estimar os erros do modelo, comparando os resultados com os valores definidos através das climatologias. Note-se que nesta análise são realizados automaticamente todas as possibilidades de combinações das climatologias de modo a todas serem referência.

### III.2.6. Energy

Este módulo permite o cálculo da produção energética anual em todas as turbinas eólicas, conjuntamente, se existirem climatologias, a mesma é calculada com base nestas. Relativamente às propriedades do presente módulo destacam-se as seguintes:

- *Air density correction*: para o caso da curva de potência de determinada turbina eólica ser definida para uma densidade específica, possibilita a correção para a densidade definida no modelo.
- *Method for density correction*: é possível a aplicação de dois métodos de correção à curva de potência de uma turbina eólica dependendo do sistema de controlo de potência e de acordo com a *World Energy Control Systems* (WECS).
- *Sector interpolation*: A seguinte propriedade no presente módulo segue a descrição da propriedade com mesmo nome do módulo *Wind Resources*.
- *Wake effects*: A seguinte propriedade no presente módulo segue a descrição da propriedade com mesmo nome do módulo *Wind Resources*.
- *Export vertical profiles*: permite a extração de um ficheiro contendo o perfil vertical para a localização de todas as turbinas eólicas. Os ficheiros extraídos possuem uma elevação mínima igual à cota da orografia e uma elevação máxima igual à elevação de base de dados comprimida.
- *Export rotor profiles*: possibilita a extração do perfil do rotor para todas as turbinas eólicas modeladas. O ficheiro extraído contém a informação das variáveis avaliadas (velocidade e direcção do vento) para todos os cantos de um cubo imaginário centrado no rotor e com uma aresta igual diâmetro do rotor.
- *Export power history*: transfere todas as climatologias modeladas para a altura do rotor, extraíndo os valores da potência eléctrica de acordo com a correção do método de correção da densidade definido.

## Anexo IV – Esquema global da metodologia

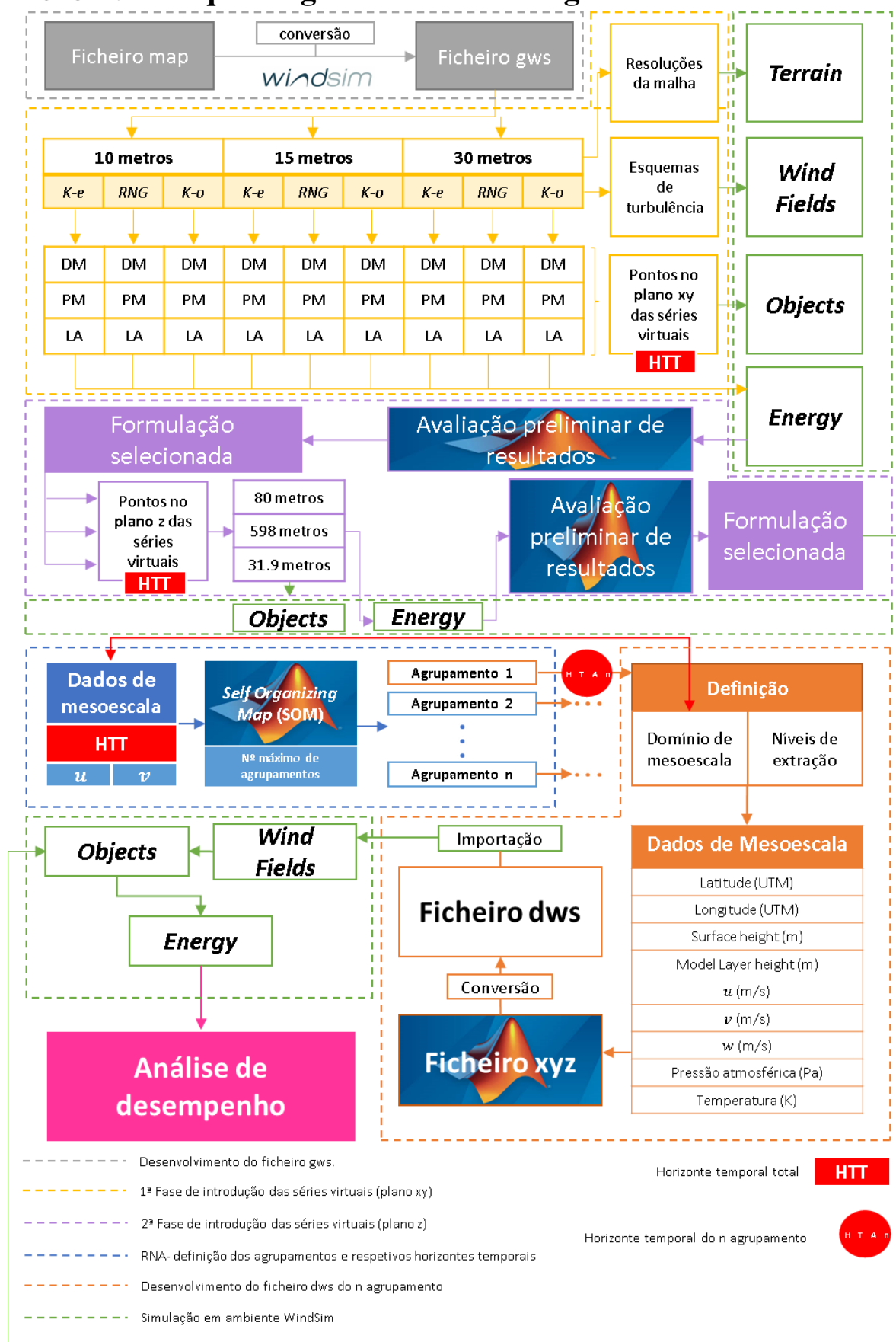


Figura IV- 1: Esquema total da metodologia aplicada na presente dissertação.

## Anexo V – Análise horária dos dados reais

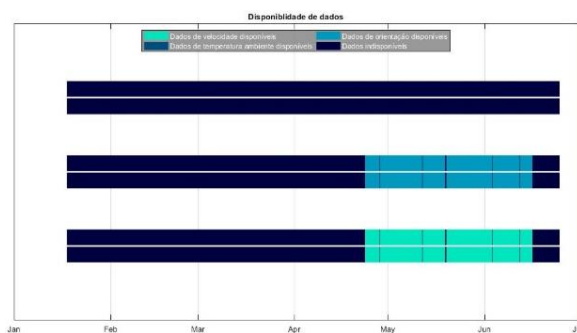


Figura V- 1: Disponibilidade dos dados estação TNW 1 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).

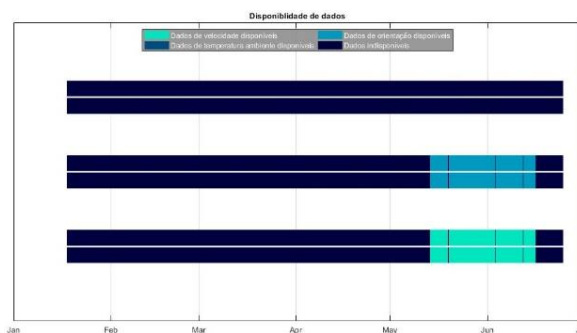


Figura V- 2: Disponibilidade dos dados estação TNW 2 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).

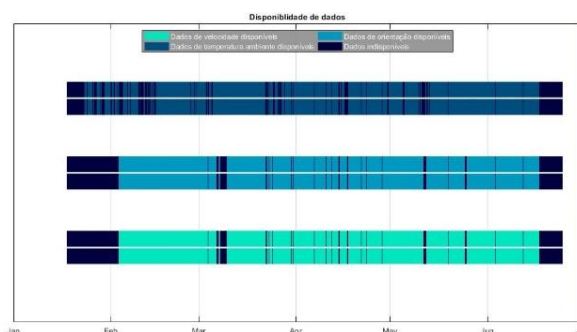


Figura V- 3: Disponibilidade dos dados estação TNW 3 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).

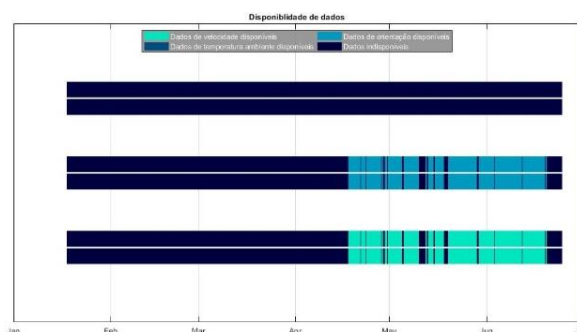


Figura V- 4: Disponibilidade dos dados estação TNW 4 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).

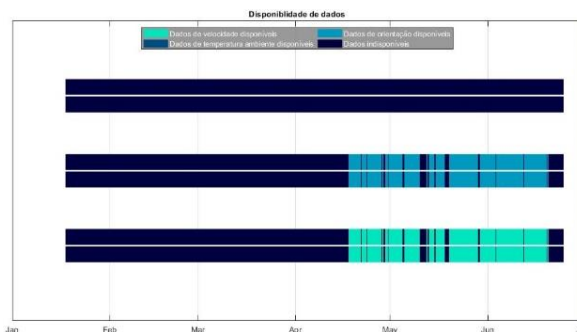


Figura V- 5: Disponibilidade dos dados estação TNW 5 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).

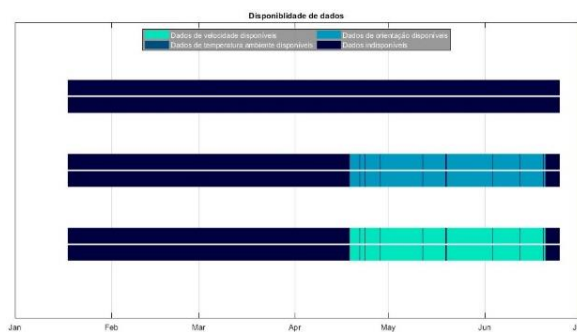


Figura V- 6: Disponibilidade dos dados estação TNW 6 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).

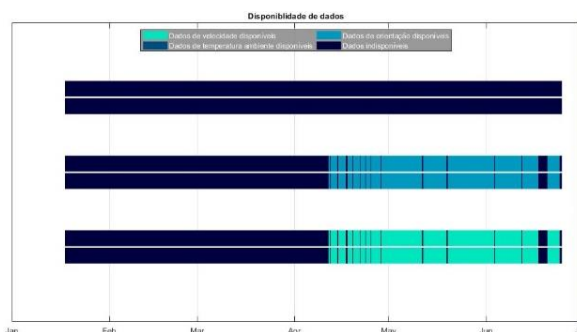


Figura V- 7: Disponibilidade dos dados estação TNW 7 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).

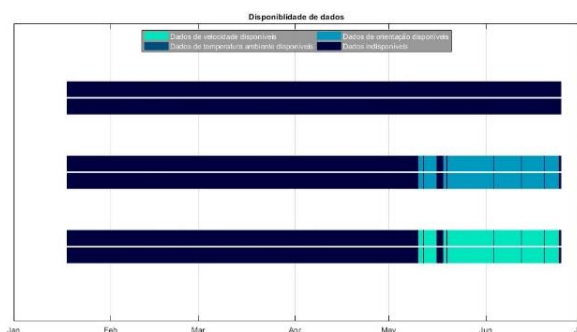


Figura V- 8: Disponibilidade dos dados estação TNW 8 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).

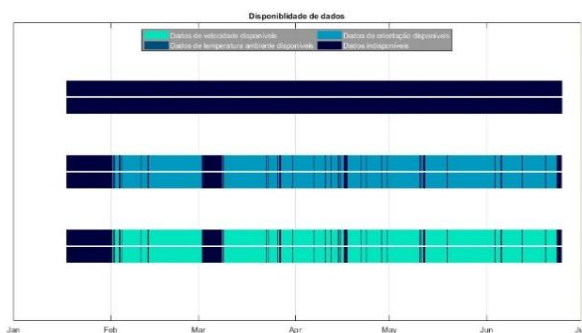


Figura V- 9: Disponibilidade dos dados estação TNW 9 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).

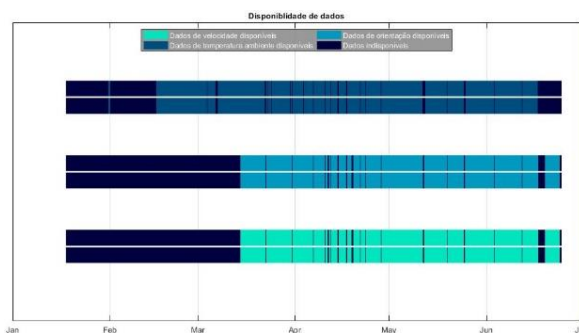


Figura V- 10: Disponibilidade dos dados estação TNW 10 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).

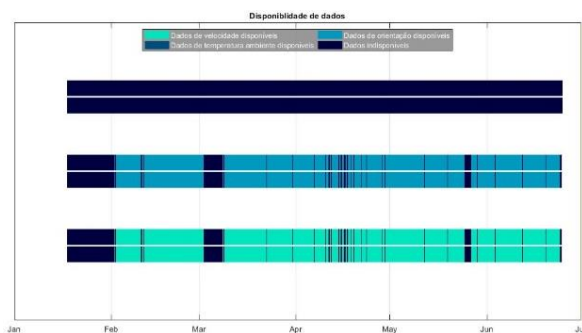


Figura V- 11: Disponibilidade dos dados estação TNW 11 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).

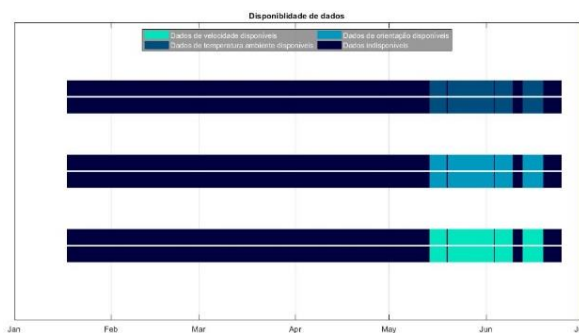


Figura V- 12: Disponibilidade dos dados estação TNW 12 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).

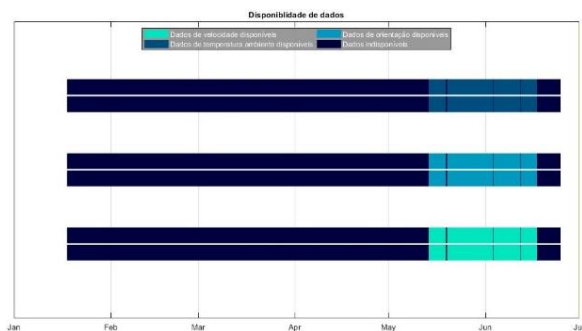


Figura V- 13: Disponibilidade dos dados estação TNW 13 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).

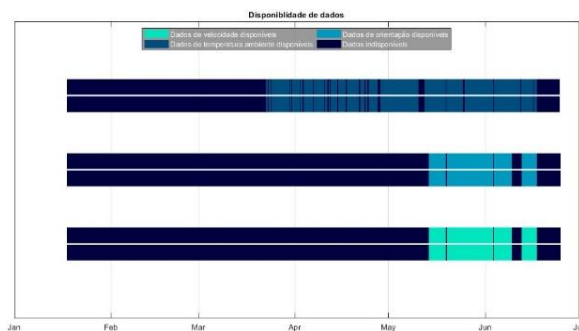


Figura V- 14: Disponibilidade dos dados estação TNW 14 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).

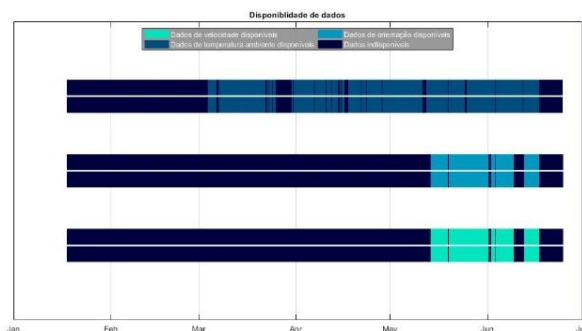


Figura V- 15: Disponibilidade dos dados estação TNW 15 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).

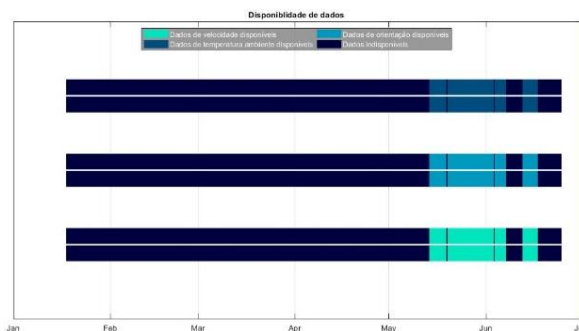


Figura V- 16: Disponibilidade dos dados estação TNW 16 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).

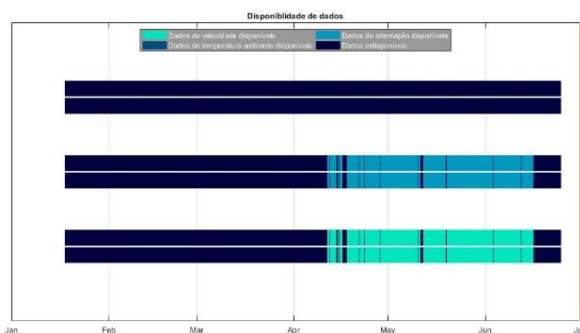


Figura V- 17: Disponibilidade dos dados estação TSE 1 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).

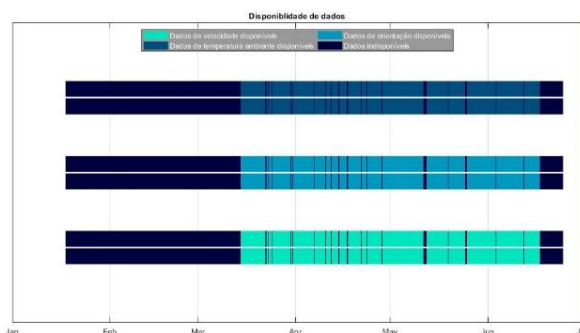


Figura V- 18: Disponibilidade dos dados estação TSE 2 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).

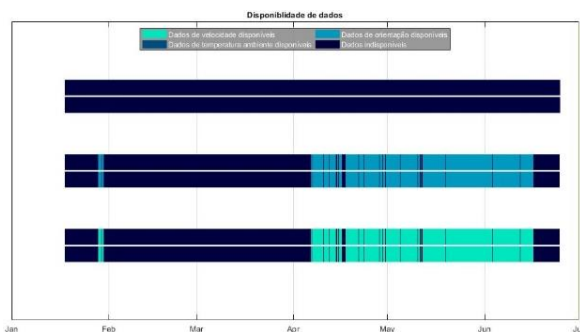


Figura V- 19: Disponibilidade dos dados estação TSE 3 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).

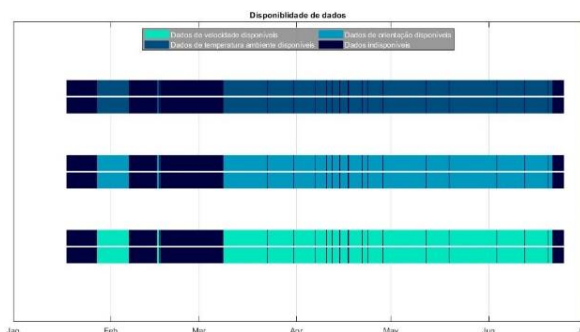


Figura V- 20: Disponibilidade dos dados estação TSE 4 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).

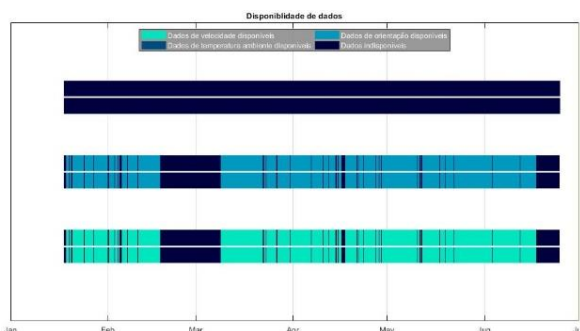


Figura V- 21: Disponibilidade dos dados estação TSE 5 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).

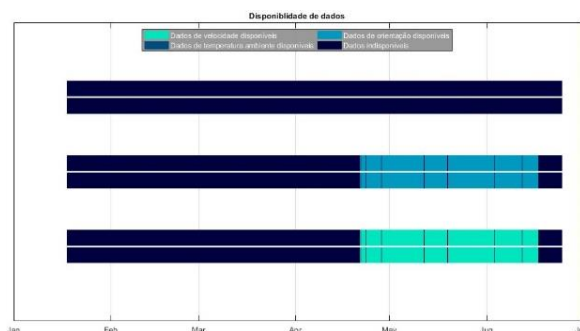


Figura V- 22: Disponibilidade dos dados estação TSE 6 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).

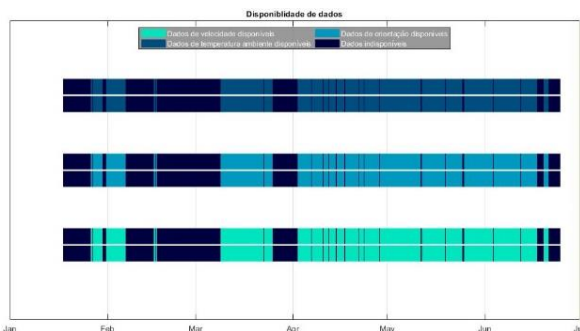


Figura V- 23: Disponibilidade dos dados estação TSE 7 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).

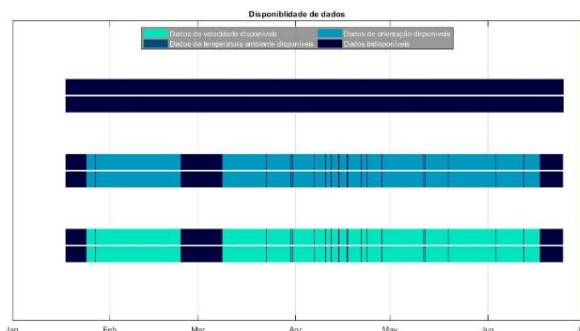


Figura V- 24: Disponibilidade dos dados estação TSE 8 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).

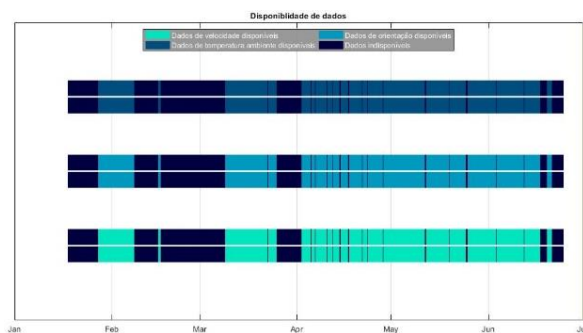


Figura V- 25: Disponibilidade dos dados estação TSE 9 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).

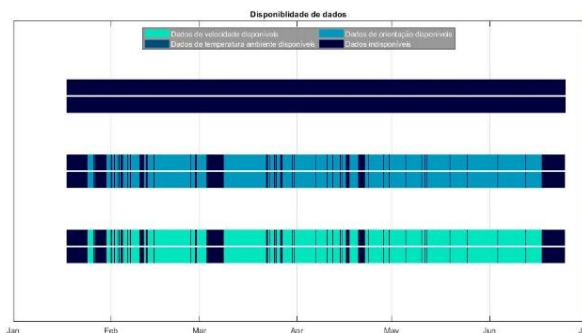


Figura V- 26: Disponibilidade dos dados estação TSE 10 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).

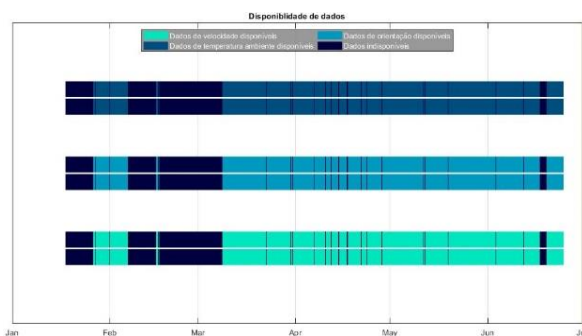


Figura V- 27: Disponibilidade dos dados estação TSE 11 (intensidade e orientação do vento e temperatura ambiente).



## Anexo VI – Rotinas em ambiente Matlab

No presente anexo são apresentadas as rotinas de formulação dos ficheiros *tnws* para as séries virtuais e para a metodologia de *nesting*, ou seja, desenvolvimento do ficheiro *xyz*. Note-se que relativamente ao desenvolvimento do ficheiro *tnws* é apresentada a rotina do método LA, isto é, a rotina mais complexa de criação de séries virtuais devido ao maior número de pontos de entrada coincidentes com os condutores das linhas de transporte existentes na zona simulada.

### VI.1. Desenvolvimento do ficheiro *tnws*

```
clc, close all; clear all;

%% INPUT DOS DADOS DE ENTRADA
np_SV=47; %numeros de pontos de entrada das séries virtuais coincidentes com as LA

%ciclo para input dos dados de entrada de mesoescala para séries Virtuais
for i=1:np_SV
    data = sprintf('UV %d', i);
    UV.(data)=load(['.\Dados MM5 Corrigidos\Dados_1_', num2str(i), '.mat']);
    UV.(data)=UV.(data).Final;
end

%ciclo de conversão de cartesianas para polares e aplicação de correção angular
for i=np_SV
    data = sprintf('UV %d', i);
    [D.(data), V.(data)] = cart2pol(UV.(data) (:,2), UV.(data) (:,3)); %função para
    conversao de cartesianas para polares
    D_C.(data)=270-rad2deg(D.(data)); %correção da origem do referencial
    for j=1:length(D_C.(data))
        if D_C.(data)(j)<0
            D_C.(data)(j)=D_C.(data)(j)+360;
        end
        if D_C.(data)(j)>360
            D_C.(data)(j)=D_C.(data)(j)-360;
        end
    end
end

%% formulação do vetor com horinte temporal das medições
data = sprintf('UV %d', 1);
date=datestr(UV.(data) (:,1), 'mddyy'); %conversao do formato data para string
time=datestr(UV.(data) (:,1), 'HHMM'); %conversao do formato data para string
date=str2num(date);
time=str2num(time);
DATA_ARRAY=convertedata(date,time);

%% CICLO PARA AS TNW
tnw=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16]; %estações do vão Norte
TNW_COORD=xlsread('TNW_COORD.xlsx'); %input das coordenadas das estações
TNW_COORD(:,2)=TNW_COORD(:,2)+1000; %correção do referencial para igualar a
aplicada em ambiente WindSim
for i=1:length(tnw) %ciclo para print dos dados das series virtuais de acordo com a
formatação tns.
    data = sprintf('UV %d', (i+14));
    fileName = sprintf('timehistory_tnw%d.tws', tnw(i));
    fileID = fopen(fileName, 'w');
    fprintf(fileID, 'version           : 480\n');
    fprintf(fileID, 'site name           : tnw%d .tws format\n', i);
    fprintf(fileID, 'measurement period : Janeiro 17 - Agosto 17\n');
    fprintf(fileID, 'site position      : %.2f
%.2f\n', TNW_COORD(i,1), TNW_COORD(i,2));
    fprintf(fileID, 'coordinate system  : 3\n');
```

```

        fprintf(fileID, 'measurement height : 80.0\n');
        fprintf(fileID, 'rec nr:   year:   mon:   date: hour: min:   dir:       speed:
SDspeed:\n');
        for j=1:length(DATA_ARRAY)
            fprintf(fileID, '   %4.d    %d    0%d    %02.2d    %02.2d    0    %5.1f
%3.2f\n', ...

j, DATA_ARRAY(j,1), DATA_ARRAY(j,2), DATA_ARRAY(j,3), DATA_ARRAY(j,4), D_C.(data)(j), V.(
data)(j)); %print com formatação tws
        end
        fclose(fileID);
    end

%% CICLO PARA AS TSE
tse=[1 2 4 6 7 8 9 10 11 12 13]; %estações do vão Sul
TSE_COORD=xlsread('TSE_COORD.xlsx'); %input das coordenadas das estações
TSE_COORD(:,2)=TSE_COORD(:,2)+1000; %correção do referencial para igualar a
aplicada em ambiente WindSim
for i=1:length(tse) %ciclo para print dos dados das series virtuais de acordo com a
formatação tws.
    data = sprintf('UV %d', (i+30));
    fileName = sprintf('timehistory_tse%d.tws', tse(i));
    fileID = fopen(fileName, 'w');
    fprintf(fileID, 'version                : 480\n');
    fprintf(fileID, 'site name              : tse%d .tws format\n', i);
    fprintf(fileID, 'measurement period : Janeiro 17 - Agosto 17\n');
    fprintf(fileID, 'site position          : %.2f
%.2f\n', TSE_COORD(i,1), TSE_COORD(i,2));
    fprintf(fileID, 'coordinate system   : 3\n');
    fprintf(fileID, 'measurement height : 80.0\n');
    fprintf(fileID, 'rec nr:   year:   mon:   date: hour: min:   dir:       speed:
SDspeed:\n');
    for j=1:length(DATA_ARRAY)
        fprintf(fileID, '   %4.d    %d    0%d    %02.2d    %02.2d    0    %5.1f
%3.2f\n', ...

j, DATA_ARRAY(j,1), DATA_ARRAY(j,2), DATA_ARRAY(j,3), DATA_ARRAY(j,4), D_C.(data)(j), V.(
data)(j)); %print com formatação tws
    end
    fclose(fileID);
end

```

## VI.2. Desenvolvimento do ficheiro xyz

```
clear all; close all; clc
```

```

%% UPLOAD's
meso_data=xlsread('Pontos Dominio Perdigão2_ETRS89.xlsx', 'K1:M1326'); %input dos
pontos dos dados de mesoescala
heights=[15 20 50 80 120 200 300 500 1000 1500 2000 3000]; %níveis de input dos
dados de mesoescala
np_long=34; %número de pontos em longitude dos dados de mesoescala
np_lat=39; %número de pontos em latitude dos dados de mesoescala
np_height=length(heights); %número de pontos em altura dos dados de mesoescala
np_clusters=4; %número de clusters indetificados através do SOM

%Identificação das coordenadas do mesofield
x=meso_data(:,1); %longitude
y=meso_data(:,2); %latitude

%% MAIN CODE
%calcula do ponto de longitude médio
for i=1:np_long

```

```

    x_avg(i,1)=mean(x(i:np_long:np_long*np_lat));
end
%organização dos pontos de acordo com a formatação do tws
coord(:,1)=reshape( repmat( [x_avg], 39,1 ), 1, [] )';

%calcula do ponto de latitude médio
pos=0:np_long:np_long*np_lat;
for i=1:np_lat
    coord(pos(i)+1:pos(i+1),2)=mean(y(pos(i)+1:pos(i+1)));
end

%Identificação das horas referentes a cada cluster
for i=1:np_clusters
    name=sprintf('DATA_X%d', i); %upload das variaveis com as horas de cada cluster
    DATA=load(['.\DADOS\DATA_X', num2str(i), '.mat']);
    if i==1
        CL_1(:,1)=DATA.(name) (:,1);
    elseif i==2
        CL_2(:,1)=DATA.(name) (:,1);
    elseif i==3
        CL_3(:,1)=DATA.(name) (:,1);
    elseif i==4
        CL_4(:,1)=DATA.(name) (:,1);
    end
end
clear DATA

pos=np_long*np_lat; %número de pontos de entrada dos dados de mesoescala no plano
xy

for k=1:np_clusters
    fileName = sprintf('mesofield%d', k); %nome do ficheiro
    fileID = fopen(fileName,'w'); %criação de ficheiro tws em branco
    fprintf(fileID, ' %d %d %d\r\n', np_long, np_lat, np_height+1); %print da 1ª
    linha do ficheiro

    DATA=load(['.\DADOS\DadosMesofield_ModelLayerHeight_', num2str(heights(1)), '.mat']);
    %load dos dados de mesoescala

    for j=1:np_long*np_lat
        fprintf(fileID, '%.0f %.4e %.0f %d %d %d %d %d %.3f\r\n', coord(j,1), ...
            coord(j,2), meso_data(pos_red(j),3), 0,0,0,0,98500, DATA.T(1,j)); %print
        dos dados de mesoescalana formatação tws para o nível 0 metros
    end
    clear DATA

    names=['U'; 'V'; 'W'; 'T']; %nomes das variaveis dos dados de mesoescala

    DATA=load(['.\DADOS\DadosMesofield_ModelLayerHeight_', num2str(heights(i)), '.mat']);
    if k==1 %formulação dos vetores das variaveis para o 1º cluster
        for w=1:length(names)
            WINDATA.surfaceheight=DATA.surfaceheight;
            WINDATA.(sprintf(names(w)))=DATA.(sprintf(names(w))) (:, pos_red(:));

            WINDATA.(sprintf(names(w)))=nanmean(DATA.(sprintf(names(w))) (CL_1, :));
        end

        elseif k==2 %formulação dos vetores das variaveis para o 2º cluster
            for w=1:length(names)
                WINDATA.surfaceheight=DATA.surfaceheight;
                WINDATA.(sprintf(names(w)))=DATA.(sprintf(names(w))) (:, pos_red(:));

                WINDATA.(sprintf(names(w)))=nanmean(DATA.(sprintf(names(w))) (CL_2, :));
            end

```

```
elseif k==3 %formulação dos vetores das variaveis para o 3º cluster
    for w=1:length(names)
        WINDATA.surfaceheight=DATA.surfaceheight;
        WINDATA.(sprintf(names(w)))=DATA.(sprintf(names(w)))(:,pos_red(:));
WINDATA.(sprintf(names(w)))=nanmean(DATA.(sprintf(names(w)))(CL_3,:));
    end

elseif k==4 %formulação dos vetores das variaveis para o 4º cluster
    for w=1:length(names)
        WINDATA.surfaceheight=DATA.surfaceheight;
        WINDATA.(sprintf(names(w)))=DATA.(sprintf(names(w)))(:,pos_red(:));
WINDATA.(sprintf(names(w)))=nanmean(DATA.(sprintf(names(w)))(CL_4,:));
    end

    for j=1:np_long*np_lat %print de todos os pontos de cada nivel (altura)
        fprintf(fileID,'%0f %.4e %.0f %.4f %.5f %.5f %.5f %d %.3f\r\n',...
            coord(j,1),coord(j,2),WINDATA.surfaceheight(j),heights(i),...
            WINDATA.U(1,j),WINDATA.V(1,j),WINDATA.W(1,j),98500,WINDATA.T(1,j));
    end
    pos=pos+(np_long*np_lat);
end
fclose(fileID);
```

## Anexo VII – Análise impacto séries virtuais

De forma a completar a análise técnica realizada para a metodologia de introdução de dados de mesoescala através de séries virtuais, neste anexo, expõe-se a análise da interpolação aplicada pelo *software WindSim*. Nomeadamente, os fatores de correção impostos na intensidade em função da direção do vento.

A presente análise tem como metodologia a introdução de uma série virtual, Figura VII- 1, com uma velocidade do vento constante e igual a  $25\text{ ms}^{-1}$ , e direções de  $0^\circ$  a  $360^\circ$  com incrementos de  $1^\circ$ . Desta forma, é possível inferir os fatores de correção impostos pela interpolação do *WindSim*.

```

version.....:480111
site name.....:diferençaminima.tws.format111
measurement period:..Janeiro.17..Agosto.17111
site position.....:35980.00...7890.00111
coordinate system:..3111
measurement height:..80.0111
rec.nr:..year:..mon:..date:..hour:..min:..dir:..speed:..SDspeed:111
.....1.....2017.....01.....01.....00.....0.....0.....25.00111
.....2.....2017.....01.....01.....01.....0.....1.....25.00111
.....3.....2017.....01.....01.....02.....0.....2.....25.00111
.....
.....358.....2017.....01.....15.....21.....0.....357.0.....25.00111
.....359.....2017.....01.....15.....22.....0.....358.0.....25.00111
.....360.....2017.....01.....15.....23.....0.....359.0.....25.00111

```

Figura VII- 1: Formatação da série virtuais de análise do impacto das séries virtuais.

Relativamente à metodologia imposta, foram realizadas extrações de resultados no ponto geográfico coincidente com a estação TNW 7, aplicando a interpolação do *software WindSim* (série corrigida) e série referência, ou seja, apenas com dados simulados em CFD. Neste sentido, Figura VII- 2, apresenta os resultados obtidos para um horizonte temporal de 360 horas, sendo que, o fator de correção por setor de direção ( $\theta$ ) é calculado através da seguinte equação:

$$FC(\theta) = \frac{Série_{corrigida}(\theta)}{Série_{referência}(\theta)} \quad (VII.1)$$

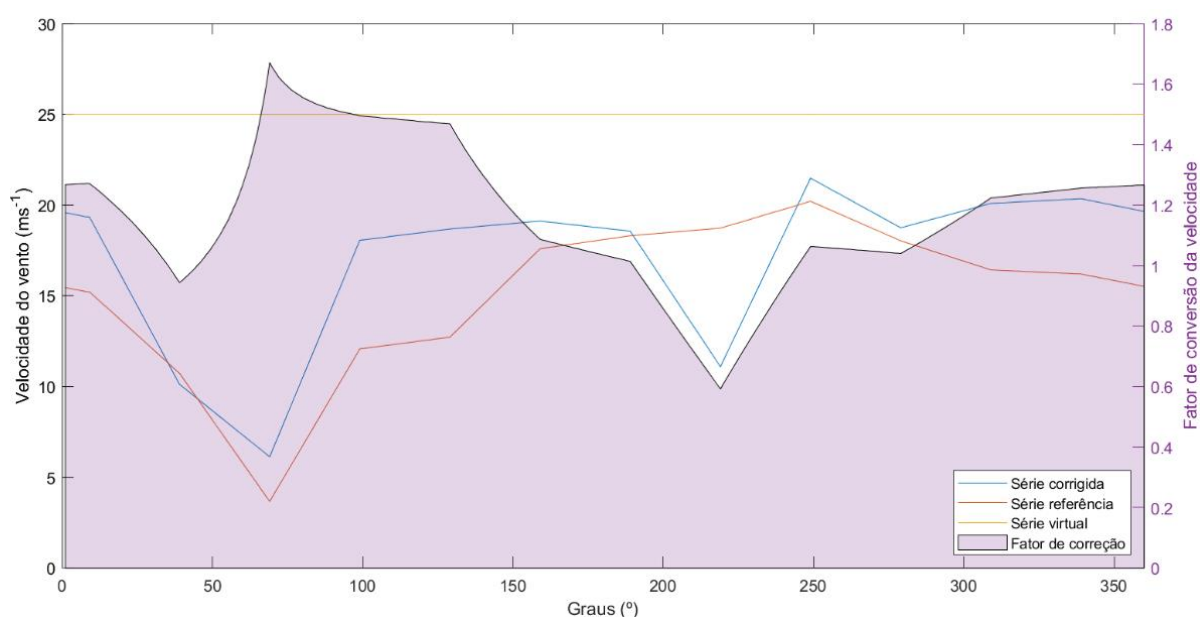


Figura VII- 2: Análise do impacto das séries virtuais. Série corrigida (linha azul), série referência (linha vermelha), série virtual (linha amarela) e fatores de correção (linha/área violeta).

Através da Figura VII- 3, é possível inferir que os fatores de correção para certas direções são bastante superiores (máximo - 1.67 para 69°) relativamente a outras direções (mínimo – 0.59 para 219°). Salienta-se que cerca de 80 % das ocorrências dos registos do fator de correção é superior a 1, o que permite concluir que a interpolação do *WindSim* tende a aumentar a magnitude da intensidade do vento nestes setores para a localização representada. Ressalva-se também que nas direções Noroeste e Sudeste a magnitude dos fatores tendem a ser superiores às direções Nordeste e Sudoeste.

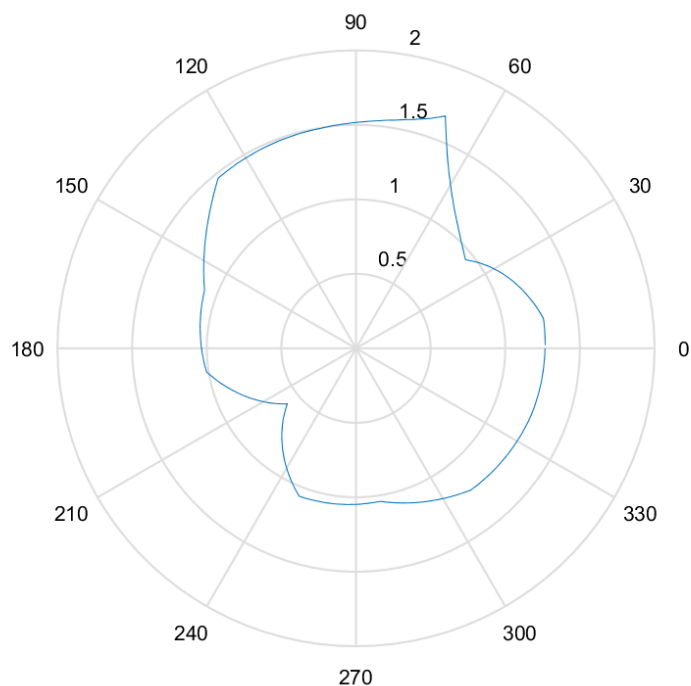


Figura VII- 3: Fatores de correção em função da direção do vento.

## Anexo VIII – Análise técnica de agrupamento SOM

De forma rematar a análise da técnica SOM, que permitiu a identificação dos quatro agrupamentos para metodologia de introdução de dados de mesoescala através de *nesting*, neste anexo, expõe-se os resultados obtidos. Através da Figura VIII- 1 e Figura VIII- 2 é possível inferir as diferenças nas componentes do vetor da velocidade do vento relativas aos agrupamentos identificados pela técnica SOM. Os agrupamentos 1 e 2 apresentam uma direção do escoamento do mesmo setor bastante similar entre si, contudo, o agrupamento 2 apresenta valores mais intensos da velocidade do escoamento. Analogamente, os agrupamentos 3 e 4 apresentam a mesma similaridade setorial, contudo, com direções contrárias e valores da velocidade do escoamento mais intensos para o agrupamento 3. Assim, através das características antes inferidas é possível associar os agrupamentos identificados pela técnica SOM com diferentes comportamentos do escoamento atmosférico.

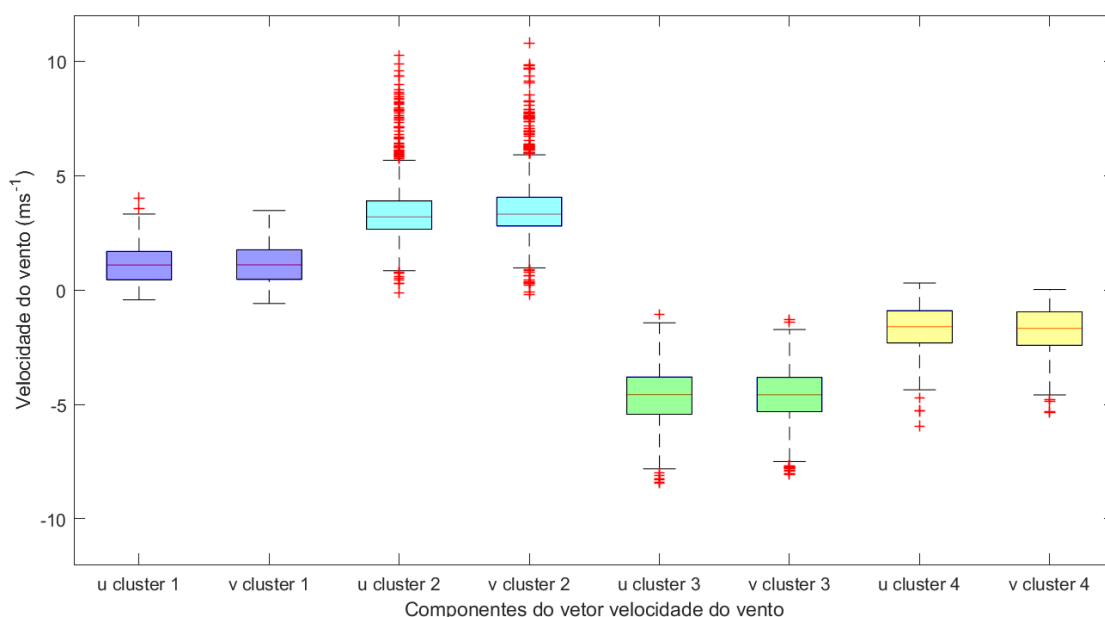


Figura VIII- 1: Diagrama de caixa e bigodes dos valores da velocidade do vento para a técnica SOM.

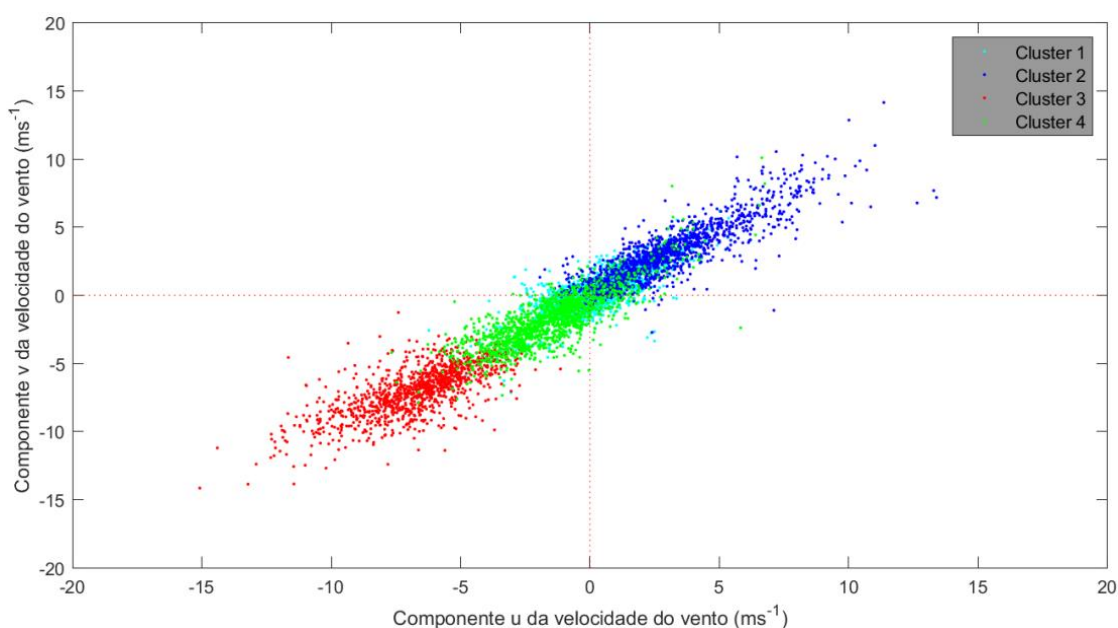


Figura VIII- 2: Dispersão das componentes do vento para a técnica de SOM.